



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS

“FRANCISCO GARCÍA SALINAS”

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA I



MAESTRÍA EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

**MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA A LA  
COMPRESIÓN DE LA ALEACIÓN Al-7Si-0.5Cu CON  
ADICIÓN DE V, Ti Y Zr.**

**TESIS**

PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

PRESENTA

**Ing. Maria Ines Rivas Recendez**

ASESOR

**Dr. Sergio Haro Rodríguez**

COASESORES

**Dr. Simitrio Ignacio Maldonado Ruíz**

**Dr. Omero Alonso González**

Zacatecas, Zac. Junio de 2021

*DEDICATORIA*

*A MI PAPÁ Y MAMÁ:*

*GERARDO RIVAS Y SOCORRO RECENDEZ*

*A MIS HERMANOS Y SOBRINO:*

*GERARDO RIVAS RECENDEZ*

*ALEJANDRINA Y SU ESPOSO FAUSTO*

*ALEJANDRA y QUIEN ESTA A SU LADO ANTONIO*

*GULLERMO JUAREZ RIVAS (MEMO)*

*A MIS TÍOS:*

*RAFAEL, LUPE, ZENAIDA, VICTORIA, RAQUEL Y OFELIA*

*AGRADECIMIENTOS*

*AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT)*

*A LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS (UAZ)*

*A LA MAESTRÍA EN CIENCIAS E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES (MCIM)*

*A MI ASESOR EL DR. SERGIO HARO RODRÍGUEZ Y A MIS COASESORES DR. SIMITRÍO MALDONADO RUIZ Y DR. OMERÓ ALONSO GONZÁLEZ, DE IGUAL FORMA A LA COLABORACIÓN DE LAS INSTITUCIONES, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN Y UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COAHUILA CON ELLO A LA DRA. ALMA GRACIELA ESMERALDA GÓMEZ Y DRA. MARÍA DEL REFUGIO LARA BANDA.*

*TAMBIÉN AGRADEZCO A LOS DOCENTES DE LA MAESTRÍA Y DE LA MISMA FORMA A LOS TÉCNICOS DE LOS LABORATORIOS QUE ME COLABORARON.*

*ESPECIALMENTE AL M. EN C. CECILIO JESÚS MARTÍNEZ GONZÁLEZ*

*A MI FAMILIA PRINCIPALMENTE A MIS PAPÁS Y HERMANOS*

## Contenido

Índice de figuras.....	1
Índice de tablas.....	7
RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	11
Capítulo I Introducción.....	13
1.1 Antecedentes.....	13
1.2 Justificación.....	16
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1 Objetivo general.....	16
1.3.2 Objetivos particulares.....	16
1.4 Impacto de la investigación.....	17
1.5 Metas.....	17
1.6 Hipótesis.....	17
Capítulo II Marco teórico.....	18
2.1 El aluminio en la manufactura automotriz.....	18
2.2 Clasificación del aluminio por series.....	18
2.2.1 Aleaciones de aluminio utilizadas en fundición.....	19
2.2.2 Serie 3XXX Si-Cu.....	19
2.3 Importancia de los elementos aleantes y sus diagramas de fase.....	20
2.4 Cabezales de motor.....	23
2.5 Adición de titanio, vanadio y zirconio, en aleaciones de aluminio y sus efectos.....	26
2.6 Diseño experimental de tipo factorial.....	28
2.6.1 Diseños factoriales $2k$ .....	29
2.7 Fundición.....	29
2.8 Presión reducida.....	30
2.9 Tratamiento térmico del Aluminio.....	31
2.10 Ensayo de compresión.....	32
2.11 Análisis de variables.....	33
Capítulo III Metodología experimental.....	34
3.1 Cálculos.....	34
3.2 Fundición y moldeo.....	35

3.3 Presión reducida.....	39
3.4 Maquinado.....	40
3.5 Tratamiento térmico.....	43
3.6 Análisis químico .....	44
3.6.1 Espectrometría de emisión por chispa.....	44
3.7 Caracterización metalográfica .....	45
3.7.1 Microscopía óptica.....	46
3.7.2 Difracción de rayos x (DRX) .....	49
3.7.3 Espectroscopía de energía dispersiva (EDX) .....	51
3.7.4 Microscopía electrónica de barrido.....	52
3.8 Dureza.....	55
3.9 Pruebas de compresión a temperatura ambiente.....	58
3.9.1 Pruebas de compresión a temperatura ambiente – As cast.....	59
3.9.2 Pruebas de compresión a temperatura ambiente – T6 .....	59
3.9.3 Pruebas de compresión a temperatura ambiente – Sobre envejecido .....	60
3.10 Pruebas de compresión a alta temperatura .....	60
3.10.1 Pruebas de compresión a alta temperatura – Sobre envejecido .....	62
3.11 Análisis de variables .....	62
Capítulo IV Resultados .....	63
4.1 Presión reducida.....	63
4.2 Análisis químico .....	64
4.2.1. Espectrometría de emisión óptica (Prueba de chispa) .....	64
4.3 Caracterización metalográfica .....	65
4.3.1 Microscopía óptica.....	65
4.3.2 Caracterización de fases y elementos mediante difracción de rayos x (DRX).....	76
4.3.3 Caracterización de fases mediante Espectroscopía de rayos x de energía dispersiva (EDX).....	83
4.3.4. Caracterización metalográfica mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).....	100
4.4 Dureza.....	106
4.5 Pruebas de compresión a temperatura ambiente.....	107
4.5.1 Pruebas de compresión a temperatura ambiente – As cast.....	111
4.5.2 Pruebas de compresión a temperatura ambiente – T6 .....	114

4.5.3 Pruebas de compresión a temperatura ambiente – Sobre envejecido .....	117
4.5.4 Comparación de resultados de compresión a temperatura ambiente .....	120
4.6 Análisis de variables.....	129
Capítulo V Conclusiones.....	159
Trabajos futuros .....	162
Bibliografía.....	163

## Índice de figuras

Figura 1. Cabezal de motor. ....	14
Figura 2. Diagrama de fase Al-Cu .....	21
Figura 3. Diagrama de fase Al-Si.....	22
Figura 4. Culata seccionada, elaborada con aleación de aluminio. ....	24
Figura 5. Cabezal de motor Honda D15A3 con arbol de levas. ....	25
Figura 6. Culata Morini. ....	25
Figura 7. Esquema de flujo del proceso de fundición de piezas. ....	30
Figura 8. Componentes de equipo utilizado en una prueba de presión reducida.....	31
Figura 9. Gas argón utilizado para desgasificar la aleación y evitar poros. ....	36
Figura 10. Colado de la aleación base en moldes de metal. ....	37
Figura 11. Colado de las aleaciones finales en moldes cilíndricos de metal.....	38
Figura 12. Equipo con el cual se realizó la prueba de presión reducida. ....	39
Figura 13. Torno con el que se elaboraron las probetas.....	40
Figura 14. Cortando probetas en torno horizontal. ....	41
Figura 15. Realizando rectificación de probetas para pruebas específicas .....	42
Figura 16. Gráfica del tratamiento térmico T6 aplicado en las aleaciones de estudio .....	43
Figura 17. Elaboración de muestra para análisis químico, Espectrómetro de emisión óptica por chispa. ....	44
Figura 18. Muestra después de ser sometida a la Espectrometría de emisión por chispa.....	45
Figura 19. Desbaste de probetas para ser analizadas en microscopía óptica.....	46
Figura 20. Pulido de probetas en herramienta mecánica. ....	47
Figura 21. Análisis de muestras en microscopio marca Union Versament modelo III.....	48
Figura 22. Muestras preparadas para sus respectivos análisis. ....	49
Figura 23. Corte de probetas de 10mm de diametro por < 0.6mm de altura. ....	50
Figura 24. Preparación y clasificacion de muestras para ser enviadas a análisis.....	50
Figura 25. Limpieza de probetas por ultrasonido. ....	51
Figura 26. Ataque químico de probetas. ....	51
Figura 27. Equipo para con el que se realizó la espectroscopía de rayos x de energía dispersiva. .	52
Figura 28. Limpieza de ultrasonido de capsula con cuatro probetas para ser analizadas por microscopía electronica de barrido. ....	53
Figura 29. Ataque químico de capsula con cuatro probetas para ser analizados por microscopía electronica de barrido. ....	53
Figura 30. Marcado probetas para llevar una clasificacion adecuada . ....	54
Figura 31. Equipo de microscopía electrónica de barrido con el cual se realizó el análisis a nuestras aleaciones. JEOL, modelo JSM-6510LV. ....	55
Figura 32. Probetas preparadas y clasificadas para ser analizadas en la prueba de dureza. ....	56
Figura 33. Análisis de dureza.....	57
Figura 34. Probeta probada por dureza en la que podemos obsercar la identaciones realizadas...	57
Figura 35. Dimensiones de las muestras circulares recomendadas.....	58
Figura 36. Probetas clasificadas para ser sometidas a pruebas de compresión a temperatura ambiente. ....	59

Figura 37. Probetas preparadas en el horno para alcanzar la temperatura deseada y ser sometidas a compresión a alta temperatura. ....	61
Figura 38. Probeta en prensa a alta temperatura.....	61
Figura 39. Termostato para verificar la temperatura deseada en la prueba de compresión a alta temperatura. ....	62
Figura 40. Muestras sometidas a pruebas de presión reducida. ....	63
Figura 41. Aleación 0 en diversas condiciones, 200X. a) colada, b) tratada térmicamente y c) sobre envejecida. ....	65
Figura 42. Aleación 0 en diversas condiciones, 500X. a) colada, b) tratada térmicamente y c) sobre envejecida. ....	66
Figura 43. Aleación 1 en diversas condiciones, a 200X. a) colada, b) tratada térmicamente y c) sobre envejecida. ....	67
Figura 44. Aleación 1 en diversas condiciones, a 500X. a) colada, b) tratada térmicamente y c) sobre envejecida. ....	68
Figura 45. Aleación 4 en diversas condiciones, a 200X. a) colada, b) tratada térmicamente y c) sobre envejecida. ....	69
Figura 46. Aleación 4 en diversas condiciones, a 500X. a) colada, b) tratada térmicamente y c) sobre envejecida. ....	70
Figura 47. Aleación 8 en diversas condiciones, a 200X. a) colada, b) tratada térmicamente y c) sobre envejecida. ....	71
Figura 48. Aleación 8 en diversas condiciones, a 500X. a) colada, b) tratada térmicamente y c) sobre envejecida. ....	72
Figura 49. Micrografía de las aleaciones en condición colada, a 500X, a) Aleación A0, b) aleación A1, c) aleación A4 y d) aleación A8. ....	73
Figura 50. Micrografía de las aleaciones en condición tratada térmicamente, a 500X, a) aleación A0, b) aleación A1, c) aleación A4 y d) aleación A8.....	74
Figura 51. Micrografía de las aleaciones sobre envejecidas, a 500X, a) Aleación A0, b) aleación A1, c) aleación A4 y d) aleación A8.....	75
Figura 52. Fases encontradas en la aleación 0 en condición As Cast, mediante el método de difracción de rayos x. ....	76
Figura 53. Fases encontradas en la aleación 1 en condición As Cast, mediante el método de difracción de rayos x. ....	77
Figura 54. Fases encontradas en la aleación 4 en condición As Cast, mediante difracción de rayos x. ....	77
Figura 55. Fases encontradas en la aleación 8 en condición As Cast, mediante difracción de rayos x. ....	78
Figura 56. Fases encontradas en la aleación 0 tratada térmicamente (T6), mediante difracción de rayos x. ....	78
Figura 57. Fases encontradas en la aleación 1 tratada térmicamente (T6), mediante difracción de rayos x. ....	79
Figura 58. Fases encontradas en la aleación 4 tratada térmicamente (T6), mediante difracción de rayos x. ....	79
Figura 59. Fases encontradas en la aleación 8 Tratada térmicamente (T6), mediante difracción de rayos x. ....	80



Figura 60. Fases encontradas en la aleación 0 en condición de sobre envejecido, mediante difracción de rayos x. ....	80
Figura 61. Fases encontradas en la aleación 1 en condición de sobre envejecido, mediante difracción de rayos x. ....	81
Figura 62. Fases encontradas en la aleación 4 en condición de sobre envejecido mediante, difracción de rayos x. ....	81
Figura 63. Fases encontradas en la aleación 8 en condición de sobre envejecido, mediante difracción de rayos x. ....	82
Figura 64. Análisis por EDX de fases en la aleación 0, condición colada.....	83
Figura 65. Análisis por EDX de fases en la aleación 1, condición colada.....	84
Figura 66. Mapeo de elementos importantes en la aleación 1, colada. ....	85
Figura 67. Análisis por EDX de fases en la aleación 4, condición colada.....	86
Figura 68. Análisis por EDX de fases en la aleación 4, otra zona, condición colada. ....	87
Figura 69. Mapeo de elementos importantes en la aleación 4, colada. ....	88
Figura 70. Análisis por EDX de fases en la aleación 0, condición tratada térmicamente.....	89
Figura 71. Análisis por EDX de fases en la aleación 1, condición tratada térmicamente.....	90
Figura 72. Mapeo de elementos importantes en la aleación 1, tratada térmicamente. ....	91
Figura 73. Análisis por EDX de fases en la aleación 4, condición tratada térmicamente. ....	92
Figura 74. Mapeo químico en la aleación 4, tratada térmicamente. ....	93
Figura 75. Análisis por EDX de fases en la aleación 0, condición sobre envejecida.....	94
Figura 76. Análisis por EDX de fases en la aleación 1, condición sobre envejecida.....	95
Figura 77. Mapeo químico en la aleación 1, sobre envejecida. ....	96
Figura 78. Análisis por EDX de fases en la aleación 4, condición sobre envejecida.....	97
Figura 79. Mapeo químico en la aleación 4, sobre envejecida. ....	98
Figura 80. Micrografías de la aleación 0 (Al-7Si-0.5Cu) en diferentes condiciones, colada, tratada térmicamente y sobre envejecida. 750X.....	100
Figura 81. Micrografías de la Aleación 1 (Al-7Si-0.5Cu con 0.15V, 0.15Ti y 0.15Zr), en diferentes condiciones, colada, tratada térmicamente y sobre envejecida. 750X .....	101
Figura 82. Micrografías de la aleación 4 (Al-7Si-0.5Cu con 0.15V, 0.30Ti y 0.30Zr), en diferentes condiciones, colada, tratada térmicamente y sobre envejecida. 750X. ....	102
Figura 83. Micrografías de las diversas aleaciones en condición de colado.750X.....	103
Figura 84. Micrografías de las diversas aleaciones en condición de tratamiento térmico. 750X... ..	104
Figura 85. Micrografías de las diversas aleaciones en condición de sobre envejecido. 750X .....	105
Figura 86. Resultados de dureza, de 9 aleaciones por tres condiciones.....	106
Figura 87. Gráfica deformación-carga de prueba a compresión a temperatura ambiente As-cast .....	107
Figura 88. Gráfica deformación-carga de prueba a compresión a temperatura ambiente – T6 ... ..	108
Figura 89. Gráfica deformación-carga de prueba a compresión a temperatura ambiente – T6 ... ..	109
Figura 90. Comparación de probeta antes y después de ser sometida a compresión. ....	110
Figura 91. Esfuerzo máximo (N/mm <sup>2</sup> ) de aleaciones As Cast bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.....	111
Figura 92. Deformación máxima (%) de aleaciones As Cast bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.....	112

Figura 93. Módulo elástico (N/mm <sup>2</sup> ) de aleaciones As Cast bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.....	113
Figura 94. Esfuerzo Máximo (N/mm <sup>2</sup> ) de aleaciones tratadas térmicamente bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.....	114
Figura 95. Deformación máxima (%) de aleaciones tratadas térmicamente bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.....	115
Figura 96. Módulo elástico (N/mm <sup>2</sup> ) de aleaciones tratadas termicamente bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.....	116
Figura 97. Esfuerzo máximo (N/mm <sup>2</sup> ) de aleaciones sobre envejecidas bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.....	117
Figura 98. Deformación máxima (%) de aleaciones sobre envejecidas bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.....	118
Figura 99. Módulo elástico (N/mm <sup>2</sup> ) de aleaciones sobre envejecidas bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.....	119
Figura 100. Esfuerzo máximo, comparación del efecto del tratamiento térmico sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.....	120
Figura 101. Deformación máxima, comparación del efecto del tratamiento térmico sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.....	121
Figura 102. Módulo elástico, comparación del efecto del tratamiento térmico sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.....	121
Figura 103. Esfuerzo máximo, comparación del efecto del sobre envejecido sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.....	122
Figura 104. Deformación máxima, comparación del efecto del sobre envejecido sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.....	123
Figura 105. Módulo elástico, comparación del efecto del sobre envejecido sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.....	124
Figura 106. Esfuerzo máximo, comparación del efecto del tratamiento térmico y sobre envejecido sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.....	125
Figura 107. Deformación máxima, comparación del efecto del tratamiento térmico y sobre envejecido sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.....	125
Figura 108. Módulo elástico, comparación del efecto del tratamiento térmico y sobre envejecido sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.....	126
Figura 109. Resistencia a la compresión (MPa), compresión a alta temperatura 250°C en condición de Sobre envejecido.....	128
Figura 110. Gráfica de probabilidad normal de los residuos estandarizados para muestras en condición As cast.....	131
Figura 111. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y el titanio, en condición As Cast.....	131
Figura 112. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, condición As Cast.....	132
Figura 113. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el titanio y el zirconio, en condición As Cast.....	132

Figura 114. Gráfico de Box-Cox para transformaciones de potencia en el análisis de compresión a temperatura ambiente en condición As Cast.....	133
Figura 115. Gráfica de probabilidad normal de los residuos estandarizados en condición As cast. ....	135
Figura 116. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en condición As Cast. ....	135
Figura 117. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en condición As Cast. ....	136
Figura 118. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el titanio y zirconio, en condición As Cast. ....	137
Figura 119. Gráfico de Box-Cox para transformaciones de potencia en el análisis de dureza en condición As Cast. ....	137
Figura 120. Gráfica de probabilidad normal de los residuos estandarizados en condición T6.....	139
Figura 121. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en condición T6.....	139
Figura 122. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en condición T6.....	140
Figura 123. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el titanio y zirconio, en condición T6.....	140
Figura 124. Gráfico de Box-Cox para transformaciones de potencia en el análisis de compresión a temperatura ambiente en condición T6. ....	141
Figura 125. Gráfica de probabilidad normal de los residuos estandarizados en condición T6.....	143
Figura 126. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el titanio y zirconio en condición T6.....	143
Figura 127. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en condición T6.....	144
Figura 128. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en condición T6.....	144
Figura 129. Gráfico de Box-Cox para transformaciones de potencia en el análisis dureza en condición T6. ....	145
Figura 130. Probabilidad normal de los residuos estandarizados condición de sobre envejecido.	147
Figura 131. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en condición de sobre envejecido. ....	147
Figura 132. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en condición de sobre envejecido. ....	148
Figura 133. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el titanio y el zirconio, en condición de sobre envejecido. ....	148
Figura 134. Gráfico de Box-Cox para transformaciones de potencia en el análisis de compresión a temperatura ambiente en condición de sobre envejecido.....	149
Figura 135. Gráfica de probabilidad normal de los residuos para muestras en condición de sobre envejecido. ....	151
Figura 136. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en condición de sobre envejecido. ....	151

Figura 137. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el titanio y zirconio, en condición de sobre envejecido. ....	152
Figura 138. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en condición de sobre envejecido. ....	153
Figura 139. Gráfico de Box-Cox para transformaciones de potencia en el análisis de compresión a alta temperatura en condición de sobre envejecido. ....	153
Figura 140. Gráfica de probabilidad normal de los residuos estandarizados en condición de sobre envejecido. ....	155
Figura 141. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en condición de sobre envejecido. ....	155
Figura 142. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en condición de sobre envejecido. ....	156
Figura 143. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el titanio y zirconio, en condición de sobre envejecido. ....	157
Figura 144. Gráfico de Box-Cox para transformaciones de potencia en el análisis de dureza en condición de sobre envejecido .....	157

## Índice de tablas

Tabla 1. Solubilidad en solido de elementos en el aluminio .....	18
Tabla 2. Diseño del experimento y clasificación de aleaciones. ....	34
Tabla 3. Cálculos para realizar las aleaciones .....	35
Tabla 4. Peso en gramos de los elementos para la realización de las aleaciones.....	35
Tabla 5. Condiciones de ensayo- pruebas de compresión a temperatura ambiente .....	59
Tabla 6. Condiciones de ensayo de compresión a alta temperatura.....	62
Tabla 7. Resultados finales de espectrometría de emisión por chispa de las aleaciones de estudio. .....	64
Tabla 8. Fases principales encontradas en las aleaciones experimentales, mediante DRX.....	83
Tabla 9. Fases presentes en las aleaciones según su condición. ....	99
Tabla 10. Resultados de Dureza HRF.....	106
Tabla 11. Resultados de compresión a temperatura ambiente- As Cast.....	107
Tabla 12. Resultados de compresión a temperatura ambiente- T6.....	108
Tabla 13. Resultados de compresión a temperatura ambiente- sobre envejecido. ....	109
Tabla 14. Resultados de compresión a alta temperatura .....	127
Tabla 15. Ecuaciones finales en términos de factores reales obtenidas en Design-Ease 7.1. ....	158

## RESUMEN

Los cabezales de motor son las piezas del automóvil más expuesta a esfuerzos termodinámicos, y más específicamente a la fatiga térmica en las cámaras de combustión y la fatiga mecánica en las zonas del conducto de agua. Es por este motivo que es de gran relevancia estudiar las aleaciones que se utilizan en la elaboración de estos cabezales, pensando en que cada vez la industria automotriz exige aleaciones de mayor calidad que cumpla con las expectativas requeridas en la actualidad, es decir no solo se necesita resistencia y eficiencia en los materiales sino también deben ser amigables con el medio ambiente.

El objetivo principal de esta tesis fue el mejoramiento de la resistencia a la compresión de la aleación Al-7Si-0.5Cu a temperatura ambiente y alta temperatura, con la adición de elementos aleantes titanio, vanadio y zirconio, de manera conjunta, en dos niveles cada uno (0.15 y 0.30 % en peso). Para ello, se planteó un diseño de experimentos factorial  $2^k$  para elaborar 8 aleaciones con diversos contenidos de esos elementos, más la aleación de referencia Al-7Si-0.5Cu.

Las aleaciones fueron elaboradas a partir de aluminio primario puro y la adición de Ti, V y Zr se hizo a partir de aleaciones maestras Al-Ti, Al-V y Al-Zr. Para la fundición se utilizó un horno de crisol de resistencias eléctricas, la desgasificación se hizo con una lanza y gas argón y el colado de aleaciones se realizó en moldes metálicos.

Posterior a ello las aleaciones experimentales, fueron tratadas térmicamente con un tratamiento T6 y a otro lote, se les aplicó un tratamiento térmico de sobre envejecido de 100h a 250°C.

La composición química de las aleaciones se obtuvo por espectrometría de emisión óptica, la caracterización micro estructural se realizó por microscopía óptica y microscopio electrónico de barrido (SEM) equipado con espectrómetro de energía dispersiva (EDX). La identificación de las fases se hizo por difracción de rayos X.

Las pruebas de resistencia a la compresión a temperatura ambiente y alta temperatura se hicieron en una máquina de pruebas universal. Para las pruebas alta temperatura se empleó una cámara ambiental del tipo caja reforzada de resistencias eléctricas.

Las propiedades de compresión a temperatura ambiente y dureza se determinaron para las aleaciones en condición de colado, tratado térmicamente y sobre envejecido, mientras que las propiedades de compresión a alta temperatura (250°C) se realizaron únicamente para las aleaciones sobre envejecidas. Finalmente, se realizó un análisis del efecto de las variables en la resistencia a la compresión y dureza, para las condiciones colado, tratado térmicamente y sobre envejecido empleando el Software Design Ease 7.1, obteniendo también las ecuaciones para calcular la resistencia a la compresión.

En cuanto a los resultados del análisis microestructural, la aleación base, A<sub>0</sub>, (Al-7Si-0.5Cu), consiste de una estructura dendrítica típica de una aleación colada, con un eutéctico Al-Si con agujas de silicio y partículas de Al-Cu y CuAl<sub>2</sub>. En la condición de tratamiento térmico, el silicio eutéctico entró en solución y las partículas de silicio que permanecen, engrosaron y esferoidizaron, debido al tratamiento por solución y envejecido. Mientras que el sobre envejecido de la aleación produjo la formación y engrosamiento del eutéctico.

En general, al añadir V, Ti y Zr en la aleación Al-7Si-0.5Cu, modificó el tamaño y morfología del silicio eutéctico en la condición de colada, obteniendo en consecuencia una microestructura fina y dispersa en las condiciones de tratamiento térmico y muy en particular en la condición de sobre envejecido, favorable para el comportamiento mecánico.

El análisis de difracción de rayos x de las aleaciones experimentales, mostró la presencia de Fe, Al, Ti, Si, CuFe en las tres condiciones estudiadas coladas, tratadas térmicamente y sobre envejecidas. Por otra parte, durante el tratamiento térmico ni en el sobre envejecido, se detectó la formación de otras fases. El análisis por DRX no reveló la presencia de fases con V, Ti y Zr, quizá debido a su bajo porcentaje.

En el análisis por EDX, se observó que: en la condición colada, la microestructura de las aleaciones experimentales está formada por silicio eutéctico en una matriz con elementos Si, V, Ti, Fe, Cu y Zr en solución sólida. Mientras que en las aleaciones V, Ti y Zr (aleaciones 1, 4 y 8) se identificaron además fases complejas como: *AlSiTiFeCuZr*, *AlSiFeCuZr* y *AlSiZr* y *AlSiTiVZr* en condición colada, tratada térmicamente y sobre envejecida.

En general, la adición de V, Ti y Zr en la aleación colada Al-7Si-0.5Cu, elevó su dureza.

Los resultados de pruebas de compresión a temperatura ambiente mostraron que el añadir elementos aleantes Ti, V y Zr es benéfico para el mejoramiento de las propiedades de compresión de la aleación base Al-7Si-0.5Cu particularmente en la condición de sobre envejecido. La aleación más recomendable es la aleación 8 (*Al-7Si-0.5Cu-0.30V-0.30Ti-0.30Zr*), ya que presentó mejores propiedades en compresión que la aleación base en las tres condiciones, colada, tratada térmicamente y sobre envejecida.

Los resultados de los ensayos de compresión de aleaciones sobre envejecidas por 100 h a 250°C y *ensayadas a alta temperatura* 250°C confirman el efecto favorable de la adición de elementos de aleación V, Ti y Zr, ya que elevan notablemente la resistencia a la compresión respecto de la aleación sin aleantes, aleación Al-7Si-0.5Cu. La aleación número 4 (*Al-7Si-0.5Cu-0.15V-0.30Ti-0.30Zr*) ya que presentó un incremento del 16.8 %.

Por otra parte, el estudio de análisis de variables realizado en el software Design-Ease 7.1, mostró que el titanio es el elemento que contribuye en mayor cantidad a la mejora de las propiedades de compresión en las aleaciones experimentales, además, en este estudio se obtuvieron las ecuaciones para determinar la resistencia a la compresión a temperatura ambiente, a alta temperatura y la dureza.



## ABSTRACT

### IMPROVEMENT OF THE COMPRESSION STRENGTH OF THE Al-7Si-0.5Cu ALLOY WITH ADDITION OF V, Ti AND Zr.

The objective of this thesis was the improvement of the compressive strength of the alloy Al-7Si-0.5Cu at room temperature and high temperature, with the addition of alloying elements titanium, vanadium and zirconium, jointly, in two levels each (0.15 and 0.30% by weight). For this, a  $2^k$  factorial experimental design was proposed, to elaborate 8 alloys with different contents of these elements, plus the Al-7Si-0.5Cu reference alloy.

The alloys were obtained from pure primary aluminum and copper, and the addition of Ti, V and Zr was made from Al-Ti, Al-V, and Al-Zr master alloys. For the smelting, a crucible furnace with electrical resistances was used, degassing was done with an argon gas lance, and the pouring of alloys was carried out in metal molds. Subsequently, a batch of experimental alloys were heat treated with a T6 temper and another batch an over aged heat treatment by 100 h at 250°C, was applied to them.

The chemical composition of the alloys was obtained by optical emission spectrometry, the microstructural characterization was carried out by optical microscopy and scanning electron microscope (SEM) equipped with an energy dispersive spectrometer (EDX). The identification of phases was made by X-ray diffraction technique.

Compressive strength tests at room temperature and high temperature were made on an universal testing machine. For the high temperature tests, an environmental chamber type of reinforced box with electrical resistances was used.

The compression properties at room temperature and hardness were determined for cast, heat treated and over aged alloys, while high temperature (250°C) compression properties were determined only for over aged alloys.

Finally, an analysis of the effect of the variables on the compressive strength and hardness was made, for the conditions cast, heat treated and over aged using the Design Ease 7.1 software, also obtaining the equations to determine the compressive strength.

Regarding the results of microstructural analysis, the base alloy, A0, (Al-7Si-0.5Cu), consists of a typical dendritic structure of a cast alloy, with an Al-Si eutectic with silicon needles and Al-Cu and CuAl<sub>2</sub> particles. In the heat-treated condition, the eutectic silicon went into solution and the remaining silicon particles thickened and

spheroidized due to the solution treatment and aging. While the over aged heat treatment of the alloy produced the formation and thickening of the eutectic.

In general, by adding V, Ti and Zr in the Al-7Si-0.5Cu alloy, it modified the size and morphology of the eutectic silicon in the cast condition, consequently obtaining a fine and dispersed microstructure in the heat treatment conditions and very particularly in the over-aged condition, this favorable for mechanical behavior.

X-ray diffraction analysis of the experimental alloys showed the presence of Fe, Al, Ti, Si, CuFe in the three conditions studied: cast, heat treated and over aged. On the other hand, during the heat treatment T6 nor in the over-aged heat treatment, the formation of other phases was detected. X-ray diffraction analysis did not show the presence of phases with V, Ti and Zr, perhaps due to their low percentage.

In the EDX analysis, it was observed that: in the cast condition, the microstructure of the experimental alloys is formed by eutectic silicon in a matrix with elements Si, V, Ti, Fe, Cu and Zr in solid solution. While, in the alloys with V, Ti and Zr (alloys 1, 4 and 8) complex phases were also identified as: *AlSiTiFeCuZr*, *AlSiFeCuZr* and *AlSiZr* and *AlSiTiVZr* in cast, heat treated and over aged condition.

In general, the addition of V, Ti and Zr in the cast *Al-7Si-0.5Cu* alloy increased its hardness.

The results of compression tests at room temperature showed that the addition of alloying elements Ti, V and Zr is beneficial for the improvement of the compression properties of the base alloy Al-7Si-0.5Cu particularly in the over aged condition. The most recommended alloy is alloy 8 (*Al-7Si-0.5Cu-0.30V-0.30Ti-0.30Zr*), since it presented better compression properties than the base alloy in the three conditions, cast, heat treated and over aged.

The results of the compression tests of alloys over aged for 100 h at 250°C and tested at a high temperature of 250°C confirm the favorable effect of the addition of alloying elements V, Ti and Zr, since they significantly increase the compressive strength with respect to of the alloy without alloys, alloy Al-7Si-0.5Cu. Alloy number 4 (*Al-7Si-0.5Cu-0.15V-0.30Ti-0.30Zr*) is recommended as it presented an increase of 16.8%.

Finally, the study of analysis of variables carried out with the Design-Ease 7.1 software, showed that titanium is the element that contributes the greatest amount to the improvement of the compression properties in the experimental alloys. Furthermore, in this study the equations to determine the compressive strength at room temperature, at high temperature and the hardness, were obtained.

## Capítulo I Introducción

### 1.1 Antecedentes

Debido a su enorme potencial en la industria, el aluminio es un metal muy utilizado para diversas aplicaciones, ya que además de tener una densidad muy baja en comparación de otros materiales, tiene propiedades físicas de gran interés en la industria metal-mecánica sobre todo se puede destacar la dureza, la conductividad eléctrica y térmica, resistencia sobre todo a la corrosión, etc, es por todo esto que es muy factible su aplicación dentro de la industria del transporte en piezas estructurales de muchos de los vehículos utilizados actualmente. Una de las principales características de este elemento es su buena relación de resistencia/peso, lo que permite una reducción del consumo de combustible y con ello minimizar la emisión de contaminantes a la atmósfera, disminuyendo además el costo de las piezas estructurales.

Propiedades mecánicas.

En general, las propiedades mecánicas más importantes son la resistencia, dureza, la ductilidad y la rigidez. Estas propiedades se determinan mediante ensayos de laboratorio en muestras y condiciones semejantes a las condiciones de servicio, teniendo como variables la carga aplicada, la velocidad de deformación, la temperatura, entre otras.

Cabezales de los motores Diésel y gasolina. - En el estudio de cabezales de motores de combustión interna existen varios objetivos: buena resistencia, mayor potencia, mayor resistencia a altas temperaturas, buen rendimiento, poca contaminación y bajo costo de construcción. [41]

El cabezal de motor es la parte del motor que cierra los cilindros por su lado superior y en donde van colocadas las válvulas de admisión y de escape. En la Figura 1 se muestra un ejemplo. [13]



Figura 1. Cabezal de motor.

#### En la actualidad

Más del 50% de los nuevos vehículos vendidos en el mercado de Europa Occidental están equipados con motores diésel, una creciente proporción.

Estos motores ponen altos niveles de esfuerzo termo-mecánico en los cabezales de motores a diésel, de las cuales la más importante parece ser la fatiga térmica en las cámaras de combustión y la fatiga mecánica en las zonas del conducto de agua. Mejorar las actuaciones de las aleaciones de aluminio a elevada temperatura sigue siendo un problema, ya que el rendimiento de los motores específicos continúa aumentando. [6]

#### Aleaciones Al-Si y aplicaciones

AlSiCuMg, utilizada en vehículos como el Audi A3, A4, A5, TT, CC

Al 319, utilizado en cabezales de motores diésel para vehículos como son: Challenger, Charger, 300, Durango, Grand Cherokee.

#### Aleación 356

Las aleaciones A356 (Al-(6.5-7) Si-0.25Cu-0.35Mn-(0.2-0.45) Mg-0.6Fe), son empleadas por la industria automotriz para la manufactura de componentes como: pistones, motores, cabezales de motores, y recientemente para soportes para autos

eléctricos, etc. Presentan buena relación resistencia peso y buen comportamiento mecánico en condiciones de servicio. Las aleaciones con alta limpieza (bajo Fe) presentan buen comportamiento a temperaturas elevadas. Son aleaciones tratables térmicamente con alta resistencia y dureza. [6]

Planteamiento del problema:

Los motores automotrices a gasolina y a Diésel, con sus nuevas adecuaciones a motores turbo, están siendo sometidos a condiciones de trabajo muy rigurosas, que producen diversas fallas en los motores y en los cabezales, tales como fatiga térmica y fatiga mecánica, que reducen la vida útil de los vehículos. Estos tipos de fatiga, inducen en las piezas, esfuerzos de tensión como de compresión en ciertas partes de los cabezales de motor, que ocasionan las fallas o agrietamientos.

En la actualidad se realizan diversas investigaciones en materiales para usos automotrices, tanto de aceros y materiales no ferrosos como las aleaciones Al-Si, Al-Si-Cu, Al-Si-Cu-Mg, etc, empleadas en motores automotrices. Se trata de elaborar nuevas aleaciones o realizar mejoras en las ya probadas, que modifiquen su microestructura y eleven su comportamiento. Estas investigaciones se orientan a varios campos, tales como desarrollos de nuevos materiales, modificación de la composición química de las aleaciones, aplicación de tratamientos térmicos, entre otros.

Una línea de investigación la representa la adición de elementos como el Ti, V y Zr, a aleaciones de Al-Si, Al-Si-Cu, Al-Cu, Al-Si-Cu-Mg, etc. tratando de mejorar su comportamiento mecánico a altas temperaturas y analizado propiedades como la resistencia a la tensión, a la compresión y a la termofluencia (creep). Un objetivo importante es el de encontrar aleaciones de composiciones específicas que se apliquen con gran seguridad de funcionamiento. En investigaciones realizadas, se han estudiado diversos porcentajes de estos elementos químicos, sin embargo, la investigación continúa, pues en algunos casos se añaden de manera individual y en otras en conjunto, pero en diversos contenidos, logrando comportamientos muy diferentes, según a la aleación que se aplique.

Por ello, esta investigación se plantea el mejoramiento de la resistencia a la compresión de la aleación Al-7Si-0.5Cu ya probada y empleada en pistones y cabezales de motores, por medio de la adición de elementos formadores de dispersoides que permitan elevar la resistencia a la compresión a temperatura ambiente, pero en particular a alta temperatura, 250°C, semejante a la que soportan los cabezales de motor. Para ello, se añaden los elementos Ti, V y Zr, en dos niveles, que determinan el diseño de experimento, elaborando ocho aleaciones y la aleación base o de referencia. Con el principal objetivo de determinar el porcentaje más adecuado para lograr una mejora en la resistencia a la compresión. Analizando además el efecto del tratamiento térmico y del sobre envejecido.

## **1.2 Justificación**

Ante el aumento en la producción de vehículos automotrices, con motores más potentes y ligeros, que garanticen un menor consumo de combustible y una menor contaminación ambiental, es necesario el desarrollo de nuevas aleaciones para partes automotrices, como motores de combustión interna, motores a Diesel, pistones, partes estructurales de alta resistencia, etc. o la mejora de las existentes, para cumplir con los nuevos requerimientos y exigencias en cuanto a su comportamiento mecánico, tanto a temperatura ambiente como altas temperaturas de operación.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Mejoramiento de la resistencia a la compresión de aleación Al-7Si-0.5Cu a través de la adición de elementos Ti, V y Zr, formadores de precipitados termoestables.

### **1.3.2 Objetivos particulares**

- Llevar a cabo la caracterización microestructural completa de las aleaciones en estudio, en la condición de colado, tratamiento térmico y sobre envejecido.
- Establecer el efecto de la adición de formadores de dispersoides, y tratamiento térmico sobre la microestructura y comportamiento compresivo de la aleación.
- Determinar el efecto de la adición conjunta de elementos formadores de dispersoides tales como el zirconio, vanadio y titanio en la microestructura y la resistencia a la compresión a temperatura ambiente y alta temperatura, además de la dureza.
- Establecer la resistencia a la compresión de las aleaciones a temperatura ambiente y elevada temperatura (250°C).
- Seleccionar la mejor aleación en cuanto a la resistencia a la compresión a temperatura ambiente y alta temperatura (250°C).
- Determinar con ello, el porcentaje en peso de cada elemento (V, Ti y Zr) que permita un incremento en la resistencia a la compresión.
- Realizar un análisis de variables mediante el Software Design-Ease 7.1 y obtener las ecuaciones para determinar la resistencia a la compresión a temperatura ambiente, alta temperatura y la dureza.

## **1.4 Impacto de la investigación**

Más del 50% de los nuevos vehículos vendidos en el mercado de Europa Occidental están equipados con motores diésel, una creciente proporción. Estos motores ponen altos niveles de esfuerzo termo-mecánico en los cabezales de motores a diésel, de las cuales la más importante parece ser la fatiga térmica en las cámaras de combustión y la fatiga mecánica en las zonas del conducto de agua. [6] Mejorar las actuaciones de las aleaciones de aluminio a elevada temperatura sigue siendo un problema, ya que el rendimiento de los motores específicos continúa aumentando.

Al incrementar las propiedades de la aleación incrementara el rendimiento del motor por lo que las emisiones de  $CO_2$  serán controladas de una forma más estricta con lo que se ayudara al medio ambiente.

## **1.5 Metas**

Mejorar la resistencia compresiva a temperatura ambiente y a alta temperatura (250°C) de la aleación Al-7Si-0.5Cu con la adición de V, Ti y Zr, modificando su microestructura.

## **1.6 Hipótesis**

La adición de V, Ti y Zr mejorará la resistencia a la compresión a temperatura ambiente y a altas temperaturas, en la aleación Al-7Si-0.5Cu, debido al cambio que se hará a su microestructura, principalmente mediante la formación de precipitados termoestables.

## Capítulo II Marco teórico

### 2.1 El aluminio en la manufactura automotriz

Los avances científico-tecnológicos ocurridos en la Ingeniería Mecánica y en particular en la Ingeniería Automotriz, se deben a las exigencias de reducción en el consumo de combustible y de minimizar la contaminación ambiental, por lo que se la investigación ha orientado en el estudio de diversos temas, entre ellos: mejora de la relación resistencia/peso, incremento del comportamiento de aleaciones en condiciones más severas, mejora en los diseños y reducción de dimensiones, etc.

Ejemplo de ello, los cabezales de motores, en general, sobre todo de motores a diésel, tienen el reto de un diseño de aluminio reforzado además con partículas duras dispersas, el cual debe satisfacer una alta resistencia mecánica, gran resistencia ante el desgaste, también estabilidad dimensional, conductividad térmica significativa, resistencia a la corrosión, peso bajo y un mínimo costo.

### 2.2 Clasificación del aluminio por series

Al realizar aleaciones con aluminio o cualquier otro elemento, es importante considerar la solubilidad que existe entre ellos, la Tabla 1 muestra la solubilidad de algunos elementos en el aluminio. [1]

Tabla 1. Solubilidad en sólido de elementos en el aluminio

Elemento	Temperatura (°C)	Solubilidad	
		% en peso	% Atómico
Cadmio	649	0.4	0.09
Cinc	443	70	66.4
Cobalto	657	<0.02	0.01
Cobre	548	5.65	2.4
Cromo	661	0.77	0.4
Germanio	424	7.2	2.7
Hierro	655	4.2	0.025
Litio	600	4.2	16.3
Magnesio	450	17.4	18.5
Manganeso	658	1.82	0.9
Níquel	640	0.04	0.02
Silicio	577	1.65	1.59
Plata	566	55.6	23.8
Estaño	228	~0.06	0.01
Titanio	665	~1.3	0.74
Vanadio	661	~0.4	0.21
Zirconio	660.5	0.28	0.08



### **2.2.1 Aleaciones de aluminio utilizadas en fundición.**

Las aleaciones con aluminio que se utilizan en la fundición, se localizan ajustadas por distintas organizaciones. Entre ellas las organizaciones gubernamentales (militares, federales y otras), las cuales tienen sus propias especificaciones, de igual forma lo hacen las sociedades técnicas como The American Society for Testing and Materials (ASTM) y The Society of Automotive Engineers (SAE).

Las clasificación entérminos de la composición química, empleada en esta investigación es la la avalada por la Asociación de Aluminio, la cual presenta las siguientes nomenclaturas de aleación: [1]

Serie 1xx.x Aluminio con un mínimo de pureza del 99.0 %.

Serie 2xx.x Cobre.

Serie 3xx.x Al+(Si-Mg),(Si-Cu) o (Si-Mg-Cu).

Serie 4xx.x Silicio.

Serie 5xx.x Magnesio.

Serie 6xx.x Magnesio-Silicio.

Serie 7xx.x Zinc.

Serie 8xx.x Otros elementos.

Serie 9xx.x Serie no utilizada.

### **2.2.2 Serie 3XXX Si-Cu.**

La aleación de Aluminio-Silicio tiene buenas características de resistencia al desgaste y al calor. Las aleaciones de Al-Si, son muy versátiles, debido a su alta relación resistencia-peso, buena conductividad térmica, resistencia en caliente y excelente fluidez en fundición, lo cual permiten creación de piezas complejas. La fase que se forma rica en Si, tiene alta dureza, elevando la dureza de la aleación, pero reduciendo la maquinabilidad y la ductilidad. [25]

En estas series, el principal elemento de aleación es el Si, el cual, puede variar desde 4 % hasta 22 % en peso, por lo que se pueden clasificar como aleaciones hipoeutécticas (<11 % de Si), eutécticas (11 a 12 % de Si) e hipereutécticas (>12 % de Si). [1][31]

### 2.3 Importancia de los elementos aleantes y sus diagramas de fase.

Puesto que la resistencia a la cedencia del aluminio puro es baja,  $\sigma_{0.2} < 60 \text{ Mpa}$ , se requiere elevarla, esto se logra mediante la adición de elementos de aleación, que al añadirse pueden elevar su resistencia mediante dos procedimientos: endurecimiento por solución sólida o mediante la formación de segundas fases. Así mismo, algunos elementos de aleación modifican la fluidéz del aluminio fundido.

Entre los elementos de mayor importancia que se añaden al aluminio son el boro (B), el cromo (Cr), el cobre (Cu), el hierro (Fe), magnesio (Mg), manganeso (Mn), níquel (Ni), silicio (Si), titanio (Ti), zinc (Zn) y zirconio (Zr).

Cobre (Cu): este elemento aumenta la resistencia mecánica y mediante la formación de precipitados intermetálicos  $Al_2Cu$  aumenta la dureza; añadir este elemento en una aleación de aluminio puede obtenerse una maquinabilidad y fluidez más convenientes. Su adición en aluminio tiene efectos sobre su resistencia a la fractura en caliente, resistencia a la corrosión y conductividad térmica. [25]

Por otra parte, para realizar cualquier tipo de aleaciones es de gran importancia analizar el diagrama de fases correspondiente. En ellos se pueden visualizar las temperaturas críticas, las fases que se forman en función de la composición química y las temperaturas de fusión, entre otras características. Se muestra el diagrama Al-Cu en la Figura 2. [25]

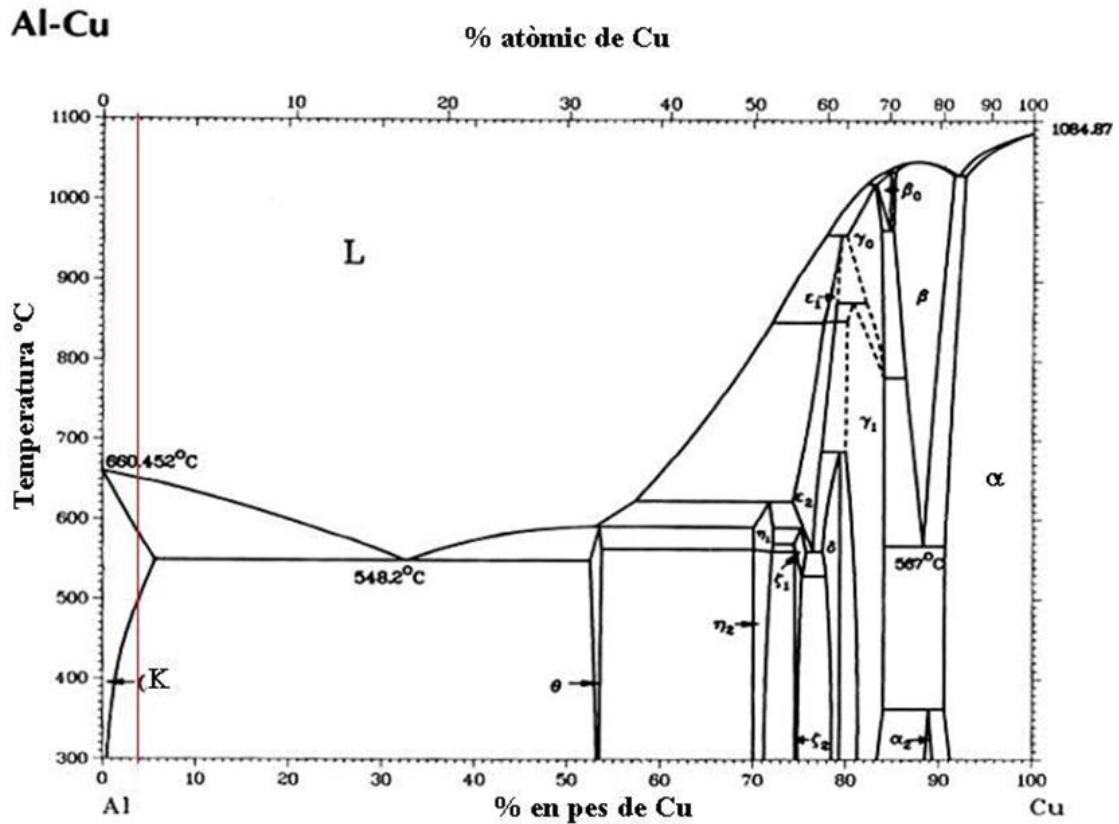


Figura 2. Diagrama de fase Al-Cu

Silicio (Si): El silicio es de suma importancia en las aleaciones de aluminio, pues mejora la resistencia a la fractura y da fluidéz a la aleación. Forma un eutéctico con el aluminio a 577°C y 11.7%Si (Figura 3). La fase Al-Si es de gran dureza lo que aumenta la dureza de la aleación, sin embargo esto disminuye su maquinabilidad y ductilidad. [32]

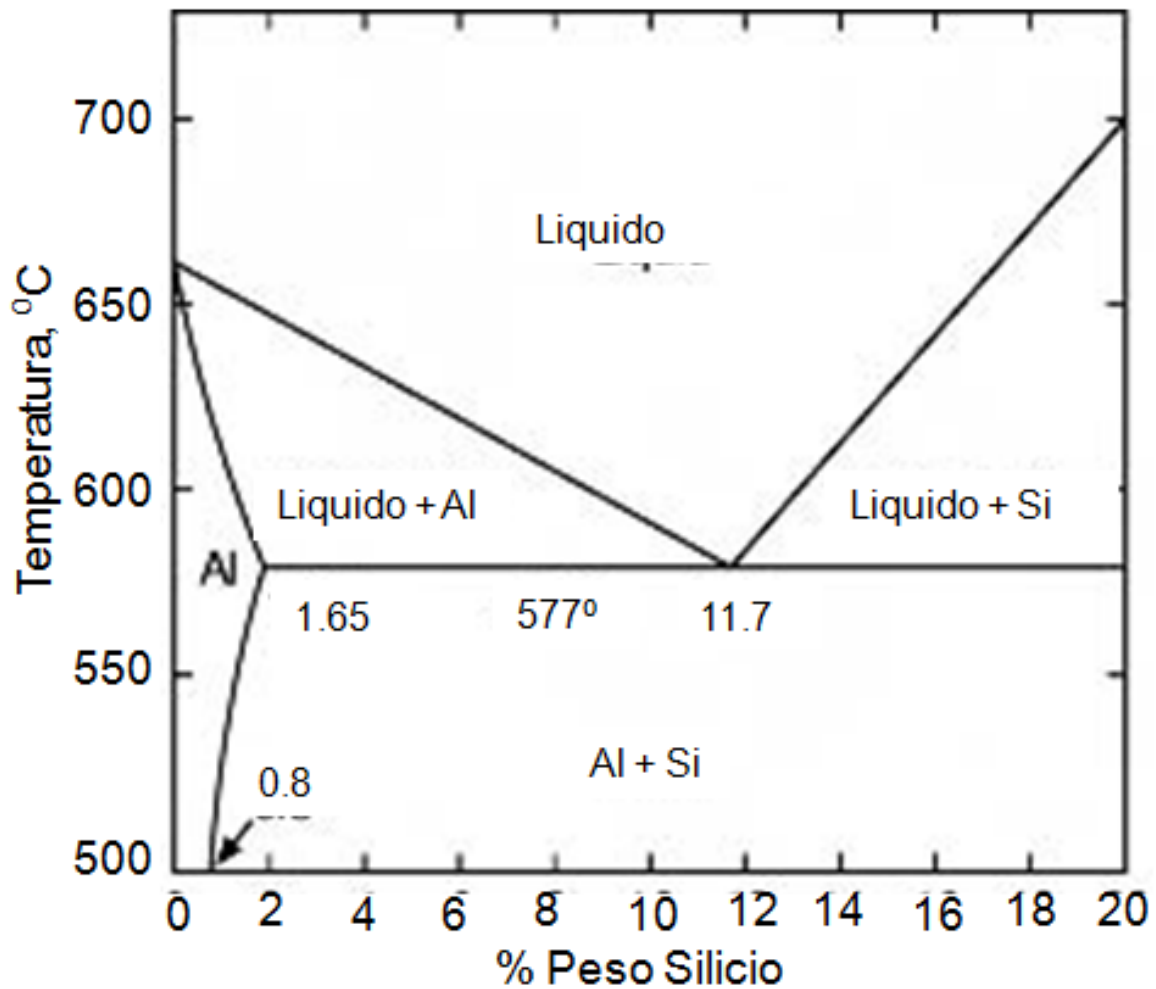


Figura 3. Diagrama de fase Al-Si

Titanio (Ti): es considerado un buen refinador de grano y se usa cotidianamente en las fundiciones de aluminio en forma de aleación maestra Al-Ti, Al-Ti-B y Al-Ti-C. Con el refinamiento de grano se logra un incremento notable de las propiedades mecánicas.

Zirconio (Zr): Este metal se es uno de los considerados elementos de aleación menores, pues se añaden solamente en algunas aleaciones de fundición y en mínimas cantidades. Actualmente se explora la conveniencia de su adición en la formación de precipitados termoestables. [20]

Vanadio (V): Sus principales propiedades son su elevada dureza, el tener puntos de ebullición y fusión elevados. Actualmente se utiliza en combinación con tianio y zirconio, para elevar la resistencia a alta temperatura de las aleaciones de aluminio.

## **2.4 Cabezales de motor.**

Se le llama cabezal de motor, culata o tapa de cilindros a la parte superior del motor de combustión interna que permite el cierre de las cámaras de combustión. Su configuración es tan diversa como los tipos de motores de combustión existentes.

Actualmente su diseño es complejo y en él se ubican las válvulas de admisión y escape, el tren de balancines. Recientemente se desplazaron los ejes de levas desde el bloque.

Esta pieza se fabrica de diferentes materiales entre ellos de hierro y aluminio, el cual ha extendido su aplicación debido a su buena relación resistencia/peso.

Actualmente se realizan muy diversas investigaciones con el fin de elevar su resistencia en particular a altas temperaturas para favorecer su aplicación en motores de mayor potencia, obtener buen rendimiento de combustible, reducir la emisión de gases de invernadero y mantener un bajo costo de manufactura.

En la actualidad más del 50% de los nuevos vehículos vendidos en el mercado de Europa Occidental están equipados con motores diésel, una creciente proporción. Estos motores ponen altos niveles de esfuerzo termo-mecánico en los cabezales de motores a diésel, de las cuales la más importante parece ser la fatiga térmica en las cámaras de combustión y la fatiga mecánica en las zonas del conducto de agua. Mejorar las actuaciones de las aleaciones de aluminio a elevada temperatura sigue siendo un problema, ya que el rendimiento de los motores específicos continúa aumentando.

En las figuras 4,5 y 6 se muestran elementos diseñados con aluminio. [39]

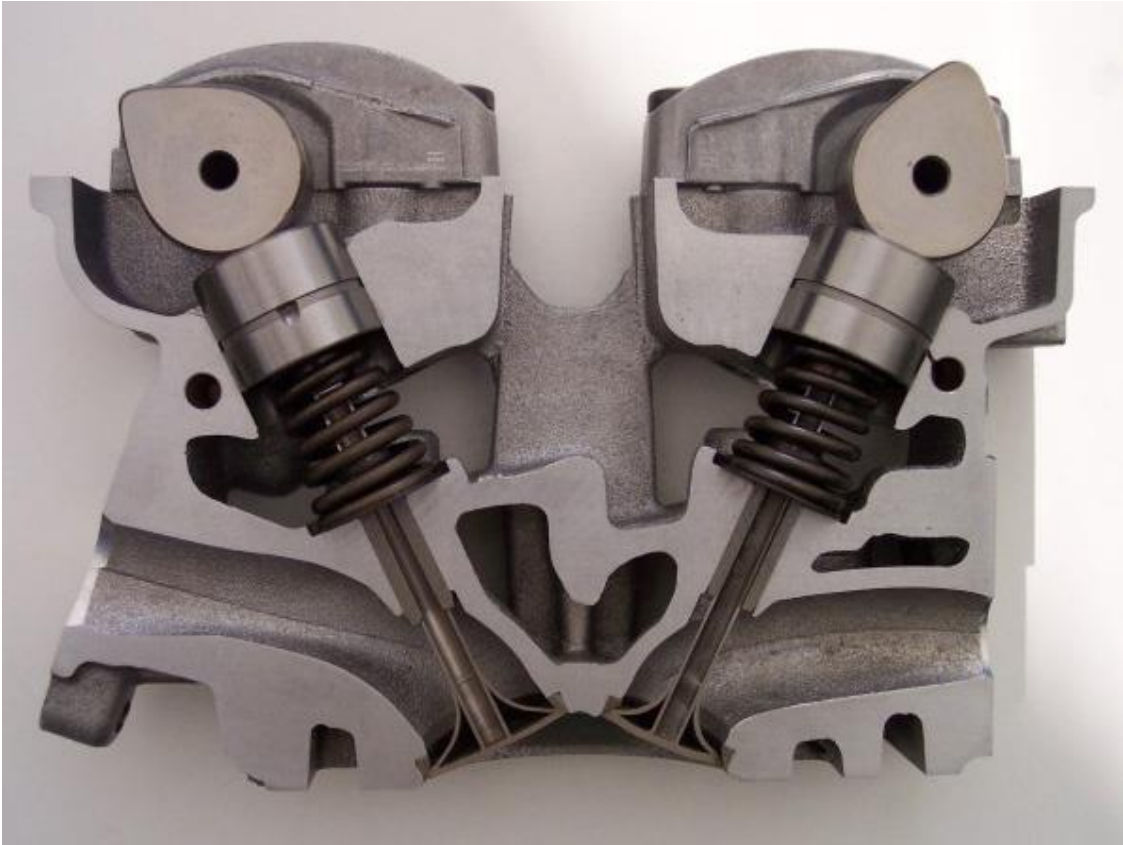


Figura 4. Culata seccionada, elaborada con aleación de aluminio.

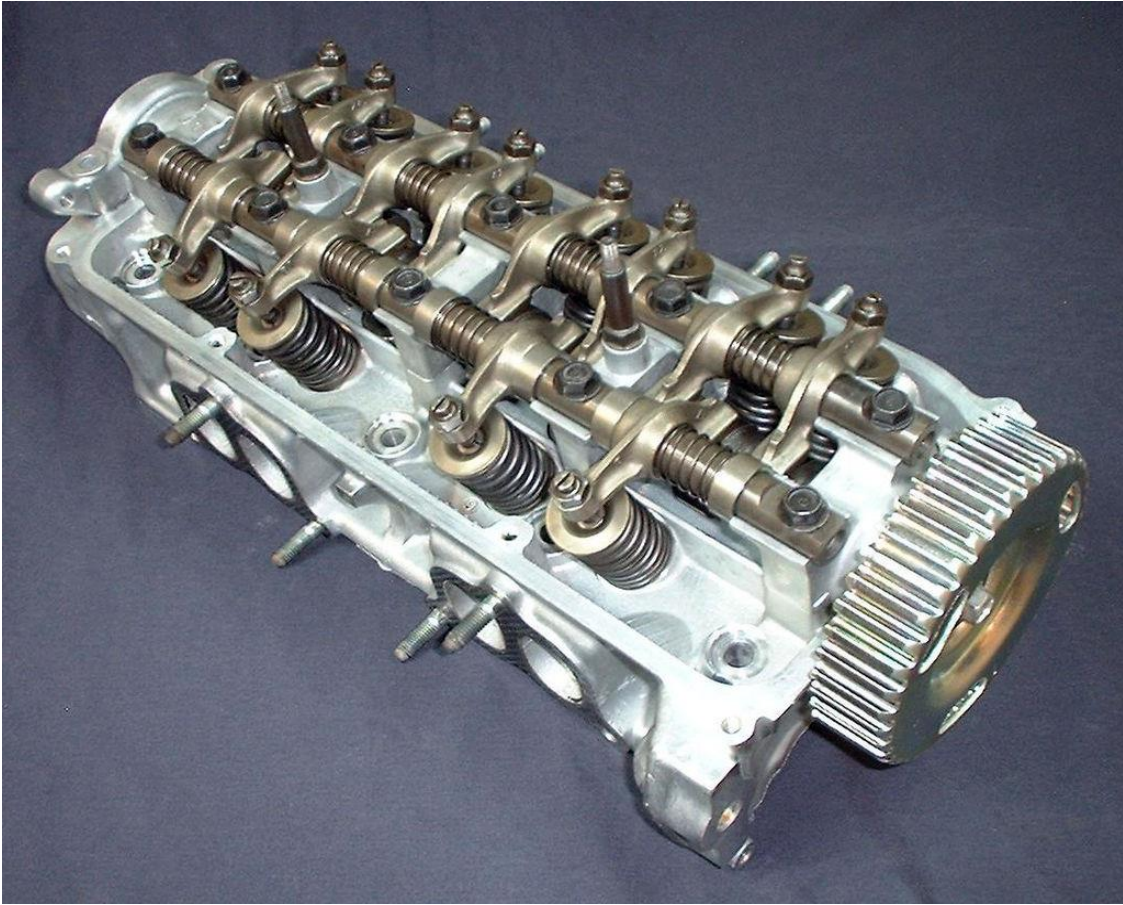


Figura 5. Cabezal de motor Honda D15A3 con arbol de levas.

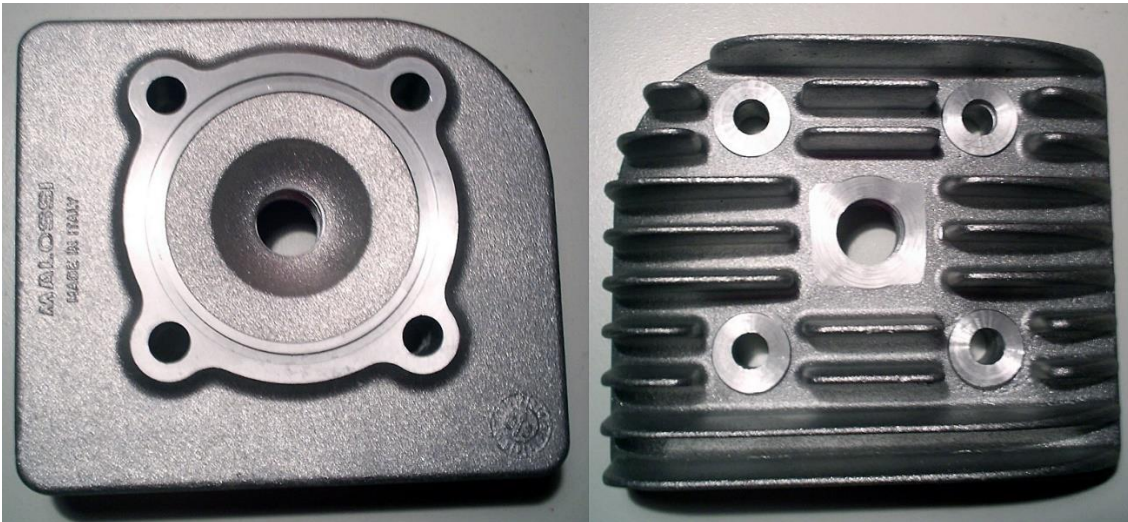


Figura 6. Culata Morini.

## 2.5 Adición de titanio, vanadio y zirconio, en aleaciones de aluminio y sus efectos

Varios autores han escrito artículos acerca del efecto en el aluminio de elementos como el Vanadio, Titanio y Zirconio, es por eso que encontramos factible experimentar con esta adición de elementos las aleaciones ya utilizadas en la industria automotriz.

Formación de precipitados termo-estables.

En el artículo "Efecto del tratamiento térmico en la microestructura y propiedades mecánicas de la aleación AL-Si-Cu-Mg fundido con micro adiciones de Zr-Ti-V" escrito por S.K Shuhu, F Czerwinski, W Kasprzak. J. Friedman en 2015, estudia las condiciones de disolución dentro del tratamiento térmico T6 de la aleación fundida de Al-Si-Cu-Mg con microadiciones de Zr-Ti-V en la que se evaluó en términos de su influencia sobre la microestructura y las propiedades mecánicas. El análisis microestructural mostró que el tratamiento de la solución cambió la morfología del silicio eutéctico de la forma de una aguja, presente después de la fundición, a una forma esférica en las fases ricas en Cu y Mg del estado T6 completamente disueltas durante el tratamiento de la solución mientras que la fase que contiene Fe, Al, Si, Mg y Fe, permaneció parcialmente en la microestructura, las fases que contienen V y Zr, Al, Si y Zr y Al, Si, Fe, Ti y V presentes en estado sólido, se disolvieron parcialmente durante el tratamiento en solución, reduciendo su tamaño. La aleación estudiada alcanzó una resistencia a la tensión máxima de 335 MPa y un límite elástico de 303 MPa. Se concluye que el tratamiento de la solución en dos pasos dio como resultado una mayor propensión a la tracción que el proceso de un solo paso, ya que los cambios de extensión fueron fuertemente influenciados por la temperatura y el tiempo. Las aleaciones de aluminio se utilizan comúnmente en la industria del transporte debido a su buena facilidad de uso, resistencia a la corrosión, bajo coeficiente de expansión térmica y especialmente su alta relación resistencia / peso. Las aleaciones de aluminio, Al-Si-Cu se utilizan en aplicaciones de trenes de potencia para piezas de motores importantes como cilindros, culatas o pistones. Sin embargo, su aplicación aún está limitada a los desafíos con la calidad del producto y los parámetros de procesamiento, como los largos procesos de tratamiento térmico, lo que aumenta el costo de producción. También se informó que estas aleaciones contienen defectos internos como porosidad, películas de un lado y otras inclusiones que degradan sus propiedades. Las aleaciones de Al-Si-Cu Mg presentan una buena resistencia a temperatura ambiente. Sin embargo, cambios en la morfología de las fases de fortalecimiento. Al-Cu. Mg-Si ó Al-Cu-Mg por encima de aproximadamente 170 ° C en la reducción del rendimiento a alta temperatura. en consecuencia, limita sus aplicaciones. Adiciones de elementos de aleación como el Ti, V y Zr con baja difusividad y baja solubilidad en aluminio, mejoran la alta resistencia, estos elementos de transición



precipitan en forma de fases de Al<sub>3</sub>Ti-aluminido de estructura L cúbica, similar al aluminio FCC. [29]

En India, Sachin Kumar Rathia, Ashok Sharma, Marisa Di Sabatinob han investigado sobre las aplicaciones de aleaciones Al-Si-Cu en la industria automotriz, en 2017 escribieron un artículo sobre la mejora de estas aleaciones añadiendo principalmente Titanio, en este artículo "Effect of mould temperature, grain refinement and modification on hot tearing test in Al-7Si-3Cu alloy" hablan de como En las últimas décadas, se ha trabajado mucho para mejorar las propiedades mecánicas y moldeabilidad de la aleación Al-Si-Cu en las industrias de fundición a través del refinamiento y modificación de granos técnicas. Entre estas aleaciones, las aleaciones Al-7Si-3Cu se utilizan popularmente en aplicaciones automotrices. para producir vehículos más ligeros y con menor consumo de combustible. El efecto del procesamiento del refinador de granos de Al-5Ti-1B y la combinación de laminado en caliente o fundido con el modificador Al-10Sr también se han estudiado para observar su efecto en minimizar el desgarro caliente formación. [17]

En cuanto a la adición de Vanadio, Titanio y Zirconio en aleaciones de aluminio para la industria automotriz, en 2011 H.A. Elhadari a, H.A. Patel a, D.L. Chena, W. Kasprzak escribieron un artículo: "Tensile and fatigue properties of a cast aluminum alloy with Ti, Zr and V additions" donde se estudia como el desarrollo de aleaciones de aluminio para aplicaciones de trenes motrices automotrices tiene una gran demanda debido a la reducción de peso y la eficiencia de combustible requeridas. El objetivo del trabajo fue evaluar la microestructura y propiedades mecánicas de una aleación fundida recién desarrollada de Al-7% Si-1% Cu-0.5% Mg con adiciones adicionales de Ti, Zr y V. La microestructura de las aleaciones consistió en dendritas de Al rodeadas por Al-Si eutéctico estructuras con partículas de Si que contienen Mg / Cu / Fe, y contenían precipitados de trialuminidos de tamaño nanométrico en las aleaciones de Ti / Zr / V añadidas. [20]

Los investigadores M. Garat y G. Laslaz describen en su artículo publicado en 2007, dos nuevos tipos de aleación primaria y sus propiedades de tracción a temperatura ambiente (RT), y de termo fluencia (creep) a 250°C y 300°C.

La primera de ellas está estrechamente derivada de la ya existente A356 + Cu0.50% y contiene adiciones de Zr y Mn. La fase de dispersoide AlSiZr mejora la fluencia terciaria a 300 ° C, sin causar ninguna pérdida de ductilidad. El segundo tipo es una aleación que contiene AlSi7Cu3-Mg y reforzada por una combinación de elementos (Ti, Zr y V). Parece ofrecer una interesante combinación de resistencia (tanto a la tracción y termo fluencia) y ductilidad entre 250-300°C. Y como parte de sus conclusiones nos presentan que una nueva aleación AlSi7Cu3.5MnVZrTi-T7 libre de Mg parece producir una ganancia mucho más importante en las propiedades de temperatura elevada, especialmente a 300 ° C, combinado con una buena ductilidad y una alta resistencia a la fatiga a temperatura ambiente, incluso a altos valores DAS. Estos conjuntos de las propiedades parecen ser prometedoras para la

resistencia tanto a la fatiga térmica como a la mecánica en las cabezas diésel de riel común. Eso también ofrece posibilidades interesantes para el uso de técnicas de enfriamiento muy suaves y la consiguiente reducción del estrés residual. [6]

Por un lado, en varios de los estudios realizados y publicados, se analiza solamente el efecto de los elementos Ti, V, Zr en propiedades de tensión, fatiga y termofluencia. Por el otro, aun cuando se muestran mejoras en su comportamiento mecánico, particularmente a altas temperaturas, la cantidad adecuada a añadir es muy diferente para cada aleación y no hay una regla de adición o cantidad recomendada en general. Por lo que se recomienda el estudio particular de cada aleación a modificar.

Por otra parte, no hay suficiente información en la literatura sobre la formación de intermetálicos de metales de transición durante la fundición y su respuesta a los tratamientos térmicos.

De estos buenos resultados, obtenidos en la mejora de propiedades de tensión y termofluencia, al utilizar estos elementos dispersoides -en algunos casos en combinación con Mn o Ni- en diversas aleaciones de Al-7Si-(0.5-3.5)Cu-Mg, Al-9Si-1.8Cu (A354), entre otras, en este trabajo se plantea el mejoramiento de la resistencia a la compresión, a temperatura ambiente y alta temperatura de la aleación A356, una aleación de uso común en la industria, tratando de determinar la cantidad adecuada de adición (% en peso) de Ti, V y Zr, añadidos conjuntamente. La composición química obtenida será de gran interés y utilidad para la industria manufacturera de partes automotrices de aleaciones de aluminio.

## **2.6 Diseño experimental de tipo factorial**

Según Douglas C. Montgomery [2], “para el análisis dos o más factores que pueden influir en la variable respuesta se realizan modelos, para ello se emplea la siguiente metodología:

1. Identificar los factores que pueden influir en la variable respuesta y proponer un modelo
2. Realizar el experimento, tomando las observaciones necesarias
3. Estimar los parámetros del modelo
4. Contrastar si los factores influyen en la respuesta
5. Si los factores influyen en la respuesta, detectar dónde radican las diferencias
6. Si algún factor no influye, simplificar el modelo y repetir los pasos anteriores
7. Realizar la diagnosis del modelo mediante el análisis de los residuos

Un diseño factorial es aquél en el que se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo. En este caso se dicen que están cruzados, apareciendo el concepto de interacción.

Se supone la existencia de repeticiones del experimento en cada una de las posibles combinaciones de los niveles del factor correspondiente.” [2]

### **2.6.1 Diseños factoriales $2^k$**

Según Douglas C. Montgomery [2] en diseños industriales frecuentemente se consideran dos niveles para cada uno de los factores que pueden intervenir en el diseño experimental. En este tipo de modelos se asume que los efectos son fijos y la aleatorización completa y se consideran las mismas restricciones que en el caso de los diseños factoriales típicos.

### **2.7 Fundición**

La fundición es un procedimiento ampliamente utilizado desde hace décadas para producción de diversas piezas vaciadas. La figura siguiente muestra el proceso convencional de vaciado. (Figura 7).

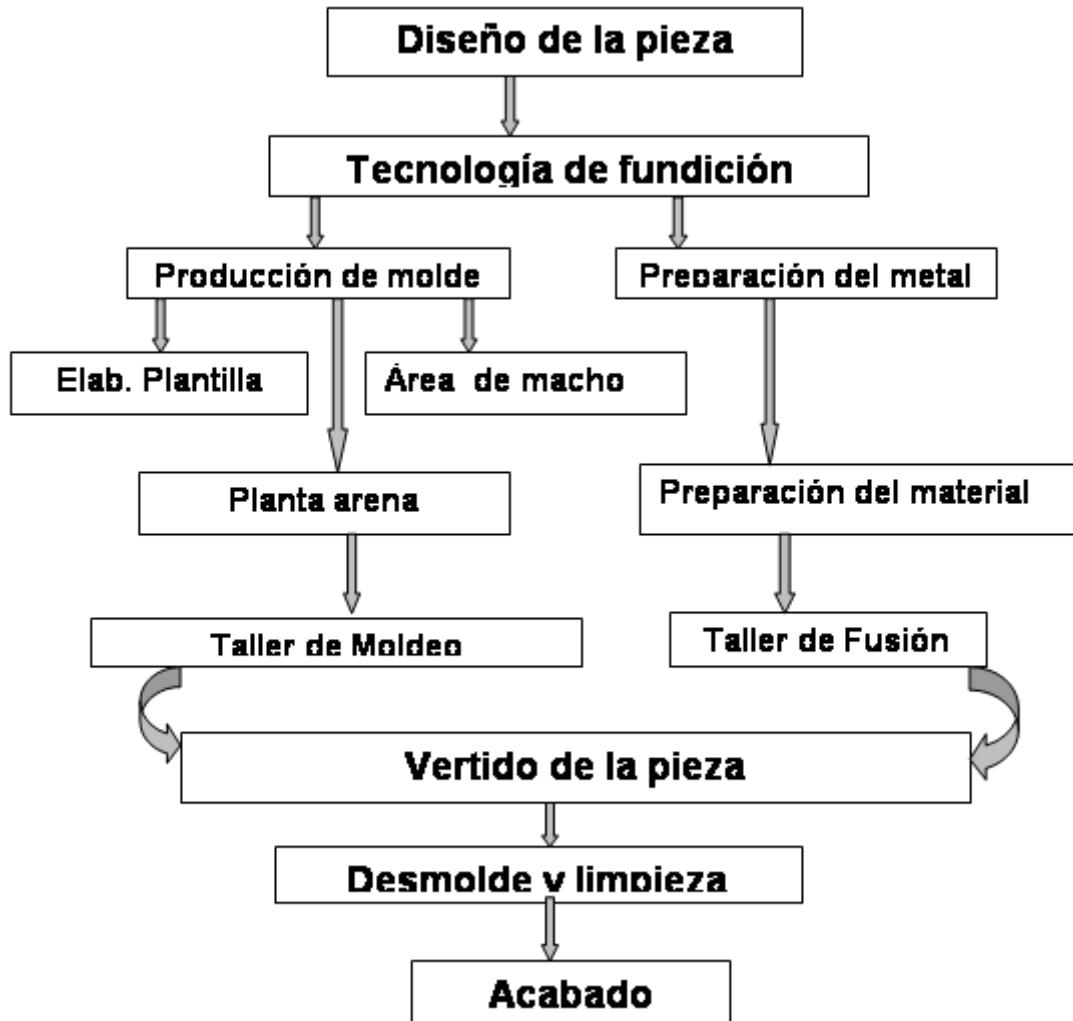


Figura 7. Esquema de flujo del proceso de fundición de piezas.

## 2.8 Presión reducida

El estudio de presión reducida se realiza al mismo tiempo que la fundición al momento de sacar el metal líquido del horno, con el fin de determinar la presencia de hidrógeno en el metal líquido, que al solidificar producirá porosidad, la cual afecta notablemente el comportamiento mecánico de las piezas elaboradas. La Figura 8 muestra los componentes del equipo.



Figura 8. Componentes de equipo utilizado en una prueba de presión reducida.

## 2.9 Tratamiento térmico del Aluminio

El tratamiento térmico puede modificar las propiedades de las piezas de aluminio vaciado, tales como la resistencia, la estabilidad dimensional, la maquinabilidad y otras muchas. El tratamiento térmico modifica la microestructura no homogénea original de fundición.

Según sean las propiedades requeridas, la fundición puede estar sujeta a una o más de las etapas de tratamiento térmico siguientes:

Tratamiento por solución (homogeneizado).

Endurecimiento por envejecimiento natural.

Endurecimiento por envejecimiento artificial

Recocido de estabilización

Recocido suave. [43]

## NOMENCLATURA DE LOS TEMPLES

Las combinaciones de tratamientos térmicos (o temple) incluyen: solución y envejecimiento; relevado de esfuerzos y estabilización; y recocido. El primer dígito de la designación de temple representa la secuencia del tratamiento térmico de tiempo y temperatura. Un dígito adicional o dos, pueden ser añadidos para indicar variación. Los temple más comunes son indicados en la lista siguiente. [1]

- T Tratado térmicamente para producir temple más estables
- T 1 Enfriado y envejecido naturalmente.
- T 2 Recocido (solo productos fundidos)
- T 3 Tratamiento en solución y luego trabajado en frío
- T 4 Tratamiento en solución y envejecido naturalmente
- T 5 Envejecimiento artificial
- T 6 Tratamiento en solución y envejecido artificialmente
- T 7 Tratamiento en solución y estabilizado, o doble maduración.
- T 8 Tratamiento en solución, trabajado en frío y envejecido artificialmente
- T 9 Tratamiento en solución, envejecido artificialmente y trabajado en frío
- T 10 Enfriado, envejecido artificialmente y trabajado en frío.

## **2.10 Ensayo de compresión**

El ensayo de compresión se realiza para determinar las propiedades de un material frente a una carga axial negativa, se puede determinar el comportamiento de un componente o sistema completo. Para ello se emplea una máquina universal. Se requiere de un software de ensayo de materiales para que el usuario configure el ensayo, se hagan los cálculos según la normativa que aplique, representar gráficas y analizar valores.

Hay una amplia normativa internacional para definir los parámetros del ensayo, requisitos de la máquina de ensayo, equipo auxiliar como horno, forma de hacer los cálculos a realizar sobre los valores obtenidos en el ensayo de tracción, etc. Las normas aplicadas son en función del tipo de material, su proceso de fabricación, aplicación y condiciones de trabajo, por ejemplo: la norma ASTM E-9: Ensayo de compresión sobre materiales metálicos. [44]

## 2.11 Análisis de variables

Como explican José Antonio Ordaz Sanz, et al, [33], los modelos de ANOVA (ANalysis Of VAriance) son técnicas de Análisis multivariante de dependencia, que se utilizan para analizar datos procedentes de diseños con una o más variables independientes cualitativas (medidas en escalas nominales u ordinales) y una variable dependiente cuantitativa (medida con una escala de intervalo o de razón). En este contexto, las variables independientes se suelen denominar factores (y sus diferentes estados posibles o valores son niveles o tratamientos) y la variable dependiente se conoce como respuesta.

Los modelos ANOVA permiten, básicamente, comparar los valores medios que toma la variable dependiente en J poblaciones en las que los niveles de factores son distintos, con la finalidad de determinar si existen diferencias significativas según dichos niveles o si, por el contrario, la respuesta en cada población es independiente de los niveles de factores. Se trata, por tanto, de un contraste paramétrico que extiende al caso de poblaciones el contraste de la igualdad de medias entre dos poblaciones independientes. [33]

## Capítulo III Metodología experimental

### 3.1 Cálculos

Para iniciar con el desarrollo experimental primeramente se realizaron los cálculos para obtener las aleaciones que se estudiaron, para esto se consideró, la cantidad de material requerido para obtener las probetas necesarias y así realizar el diseño experimental deseado, en este caso se utilizó un diseño factorial de tipo  $2^k$ , una vez establecido el peso total que se requiriera para cada aleación, se tomaron en cuenta las condiciones del material disponible: el aluminio puro se tiene en barras y se considera que no está aleado con ningún otro elemento, de la misma forma se tiene el cobre, enseguida se consideran las aleaciones maestras de donde se obtuvieron los demás elementos: Al-30Si, Al-10V, Al-6Ti y Al-10Zr. Con esta información se realizó la siguiente Tabla 5, considerando un peso total de 100g para la aleación resultante, de ahí se procedió a multiplicar según el peso real que se deseaba obtener, esto se hizo en el momento, ya que los pesos variaban al añadir los elementos.

Las aleaciones de estudio fueron las mostradas a continuación en la Tabla 2:

Tabla 2. Diseño del experimento y clasificación de aleaciones.

	FACTORES		
NIVEL	Vanadio, % peso	Titanio, % peso	Zirconio, % peso
Bajo	0.15	0.15	0.15
alto	0.30	0.30	0.30
Etiqueta	Aleación		
0	Al-7Si-0.5Cu		
1	0.15V-0.15Ti-0.15Zr		
2	0.15V-0.15Ti-0.30Zr		
3	0.15V-0.30Ti-0.15Zr		
4	0.15V-0.30Ti-0.30Zr		
5	0.30V-0.15Ti-0.15Zr		
6	0.30V-0.15Ti-0.30Zr		
7	0.30V-0.30Ti-0.15Zr		
8	0.30V-0.30Ti-0.30Zr		



Cabe mencionar que primero se realizó la aleación base es decir Al-7Si-0.5Cu (0), y de ahí se dividió para realizar las demás aleaciones con vanadio, titanio y zirconio. En la Tabla 3 podemos observar los pesos añadidos de cada aleación maestra y de cada elemento para formar las aleaciones.

Tabla 3. Cálculos para realizar las aleaciones

Aleación maestra	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Al	76.16	70.67	69.17	68.17	66.67	69.17	67.67	66.67	65.17
Al-30Si	23.33	23.33	23.33	23.33	23.33	23.33	23.33	23.33	23.33
Cu	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Al-10V	0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	3	3	3
Al-6Ti	0	2.5	2.5	5	5	2.5	2.5	5	5
Al-10Zr	0	1.5	3	1.5	3	3	3	1.5	3
Peso en gramos (g)					Cálculos para 100g				

### 3.2 Fundición y moldeado

La fundición de la aleación se realizó en dos partes las cuales se especifican en la Tabla 4.

Para la fundición de las nueve aleaciones que se emplearon se utilizó un horno eléctrico de resistencia donde se fundieron el aluminio y sus elementos de aleación Si y Cu, a una temperatura de 800 °C y los elementos V, Ti y Zr a 750°C, al realizar cada combinación de los elementos se sacó una pequeña muestra y se sometió a pruebas para corroborar que cada una de las composiciones químicas cumpliera con la especificación.

Tabla 4. Peso en gramos de los elementos para la realización de las aleaciones.

Al- 1142.5g	Al-1142.5g
Si-350g	Si-350g
Cu-7.5g	7.5g
Sacar una probeta de 200g	Sacar una probeta de 200g
Al10V-20g	Al10V-40g
Al10Zr-20g	Al10Zr-20g
Al6Ti-33g	Al6Ti-33g

Durante la fundición desgasificó, con gas argón de ultra pureza (Figura 9), por 5 min con un flujo de 4 L/h. La realización del desgasificado fue con el fin de obtener la menor porosidad y mejores resultados en el comportamiento del material.



Figura 9. Gas argón utilizado para desgasificar la aleación y evitar poros.

Ahora podemos observar cómo se realizó el colado de las primeras aleaciones realizadas (Figura 10).



Figura 10. Colado de la aleación base en moldes de metal.

En la siguiente etapa de la fundición se preparó el material ya obtenido, separándolo para agregar los distintos niveles de V, Ti, y Zr según se requirió para al final completar las distintas nueve aleaciones, durante este proceso el desgasificado fue realizado con pastilla de hexacloroetano.

Para el moldeado se utilizaron moldes de acero de 30 cm de largo y diámetro de 3 cm, sin precalentamiento, Figura 11.



Figura 11. Colado de las aleaciones finales en moldes cilíndricos de metal.

### 3.3 Presión reducida

Antes de realizar el colado de las aleaciones se tomó una muestra para realizar la prueba de presión reducida y de esta forma verificar la cantidad de poros en cada una de las aleaciones, para lo cual se utilizó el equipo con el vacuómetro mostrado en la Figura 12.



Figura 12. Equipo con el cual se realizó la prueba de presión reducida.

### 3.4 Maquinado

Se maquinaron las probetas en base a la norma ASTM E9, es decir muestras cilíndricas de 10mm de diámetro por 15mm de altura, para lo cual se utilizaron tornos mecánicos horizontales, lo cual podemos ver en las figuras 13, 14 y 15.



Figura 13. Torno con el que se elaboraron las probetas



Figura 14. Cortando probetas en torno horizontal.



Figura 15. Realizando rectificación de probetas para pruebas específicas



### 3.5 Tratamiento térmico

Se implementó el tratamiento térmico T6 el cual fue realizado en una mufla marca FELIZA, que alcanza una temperatura máxima de operación de 1,100 °C con una variación de  $\pm 2^\circ \text{C}$ .

- Tratamiento térmico

T6 tratamiento térmico y precipitación

-538°C por 12horas

-Enfriado en agua a 70°C

-Sobre envejecido por 4 horas a 154°C.

Enseguida podemos observar el Esquema gráfico de cómo se llevó a cabo este tratamiento térmico, (Figura 16).

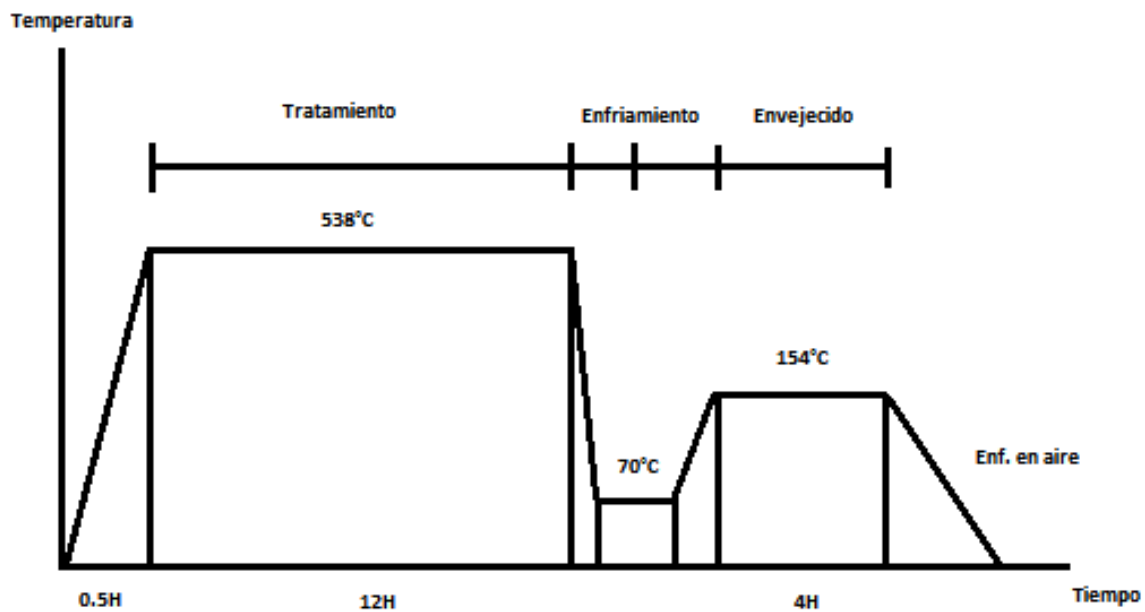


Figura 16. Gráfica del tratamiento térmico T6 aplicado en las aleaciones de estudio

## 3.6 Análisis químico

### 3.6.1 Espectrometría de emisión por chispa

Para comprobar las composiciones químicas de las aleaciones a experimentar, se tomó una muestra antes del colado y se analizó con un espectrómetro de chispa. Con este análisis se confirmó que los cálculos eran adecuados y se obtuvieron las aleaciones requeridas, por lo que se finalizó la fundición y se llevó a cabo el siguiente proceso.

Para esta prueba se empleó en un espectrómetro de emisión por chispa con el equipo Q4 TASMAN marca BRUKER, El cual se muestra a continuación al igual que una de las muestras sometidas a este análisis (Figura 17), Luego podemos observar la muestra ya analizada (Figura 18).



Figura 17. Elaboración de muestra para análisis químico, Espectrómetro de emisión óptica por chispa.



Figura 18. Muestra después de ser sometida a la Espectrometría de emisión por chispa.

### **3.7 Caracterización metalográfica**

Para realizar el estudio de caracterización metalográfica de las aleaciones se utilizaron 4 técnicas que son: Difracción de rayos x (DRX), Caracterización de fases mediante Espectroscopía de rayos x de energía dispersiva (EDX), Microscopía electrónica de barrido (SEM) y Microscopía óptica.

### 3.7.1 Microscopía óptica

Se prepararon las muestras con un pulido espejo de forma manual (Figura19) y mecánica (Figura 20), según se requirió y con ayuda de alúmina de 3 micras para el tallado final, y así poder ser observadas en el microscopio con mayor exactitud.



Figura 19. Desbaste de probetas para ser analizadas en microscopía óptica.

El desbaste grueso, desbaste fino y pulido se efectuó en una pulidora marca Metkon, modelo Forcipol 1.



Figura 20. Pulido de probetas en herramienta mecánica.

- Ataque químico

Para observar la microestructura se requiere preparar la muestra mediante un pulido fino y un ataque químico con un reactivo adecuado.

Keller

-190 ml de agua destilada

-8 ml ácido nítrico

-5 ml ácido clorídrico

-3ml ácido fluorohídrico

\* 30s

Enseguida se obtuvieron las fotomicrografías en un microscopio óptico metalográfico (MO) (marca Union Versament modelo III). (Figura 21).



Figura 21. Análisis de muestras en microscopio marca Union Versament modelo III.

### 3.7.2 Difracción de rayos x (DRX)

Las pruebas de difracción de rayos X, se realizaron en un difractómetro marca Bruker, en las instalaciones de la Maestría en Ciencia e Ingeniería de los Materiales en la Universidad Autónoma de Zacatecas, después de ser preparadas las muestras debidamente se llevaron a la experimentación. En las figuras 22, 23 y 24 se puede observar parte del proceso de la preparación de las muestras.



Figura 22. Muestras preparadas para sus respectivos análisis.



Figura 23. Corte de probetas de 10mm de diametro por  $< 0.6\text{mm}$  de altura.

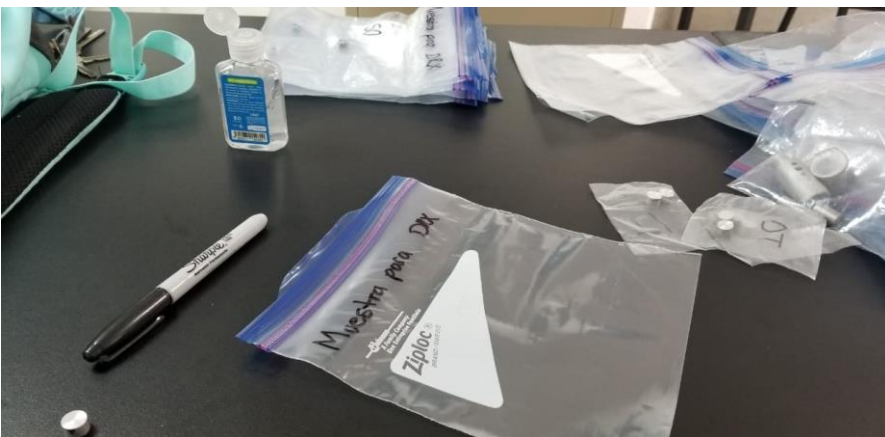


Figura 24. Preparación y clasificación de muestras para ser enviadas a análisis.



### 3.7.3 Espectroscopía de energía dispersiva (EDX)

Primeramente, se realizó la preparación de probetas de tal forma que fueran adecuadas para el equipo en el que se realizaría la prueba, para esto se encapsularon 4 muestras en cada capsula, se hizo el desbaste, limpieza en máquina de ultrasonido (Figura 25) y ataque químico por inmersión en solución Keller's, por un tiempo de 45 segundos (Figura 26), ya mencionado anteriormente.



Figura 25. Limpieza de probetas por ultrasonido.



Figura 26. Ataque químico de probetas.

Para realizar la espectroscopía de rayos x de energía dispersiva de las aleaciones se utilizó microscopio electrónico de barrido (MEB) (marca JEOL), de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, en el Campus Universitario (Figura 27).

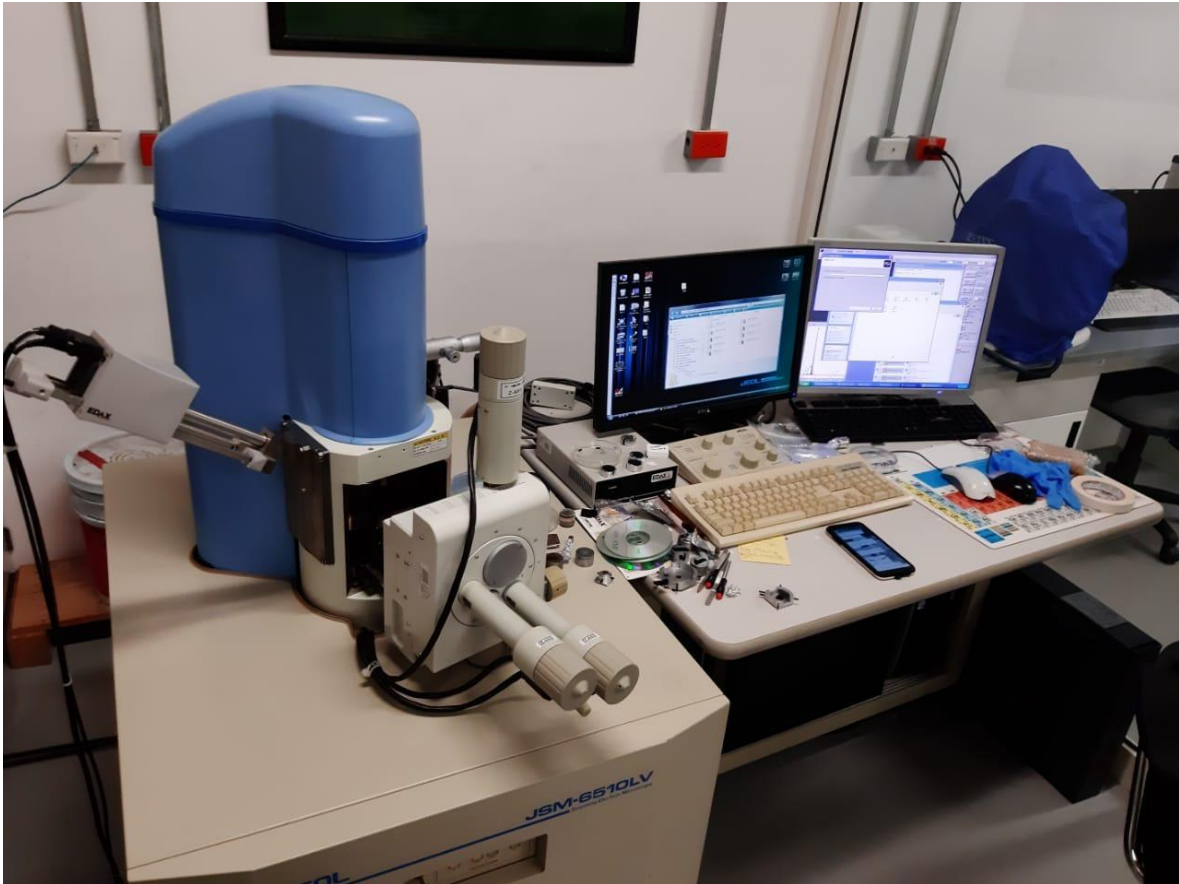


Figura 27. Equipo para con el que se realizó la espectroscopía de rayos x de energía dispersiva.

### 3.7.4 Microscopía electrónica de barrido

Esta prueba se realizó con las mismas muestras del estudio anterior, misma preparación y en el mismo equipo especificado anteriormente, Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).

En las figuras 28-31 se ve la preparación de las muestras para este estudio, así como el equipo utilizado.



Figura 28. Limpieza de ultrasonido de capsula con cuatro probetas para ser analizadas por microscopía electronica de barrido.



Figura 29. Ataque químico de capsula con cuatro probetas para ser analizados por microscopía electronica de barrido.



Figura 30. Marcado probetas para llevar una clasificación adecuada .



Figura 31. Equipo de microscopía electrónica de barrido con el cual se realizó el análisis a nuestras aleaciones. JEOL, modelo JSM-6510LV.

### 3.8 Dureza

Se seleccionaron muestras al azar de cada una de las aleaciones para ser probadas por dureza, se planteó hacer 3 pruebas en cada muestra, pero por el comportamiento poco estable se decidió hacer 5 pruebas por cada una en diferente lugar esto para promediar las posibles variaciones existentes en la superficie. Se marcaron y ordenaron las probetas de tal forma que no hubiera confusión con los resultados obtenidos (Figura 32).



Figura 32. Probetas preparadas y clasificadas para ser analizadas en la prueba de dureza.

La prueba de dureza fue realizada en un durómetro marca AFFRI, fabricado por BREVETTICEA-Inspection and Leak Detection Machines, modelo 206 Rt, usando la escala de Rockwell F, aplicando una pre-carga de 60 kg, y un indentador de bola de 1/16 pulgadas (Figura 33). Enseguida en la Figura 34 podemos observar las marcas realizadas por el indentador en una de las muestras.



Figura 33. Análisis de dureza.



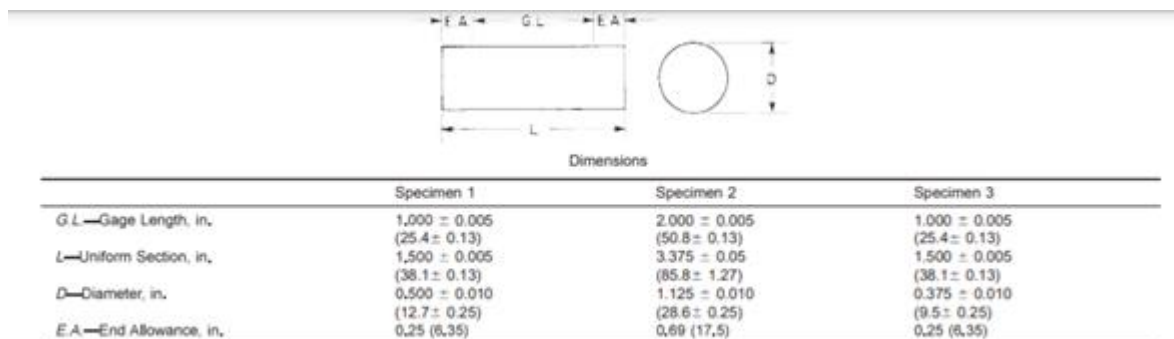
Figura 34. Probeta probada por dureza en la que podemos observar la indentaciones realizadas.

### 3.9 Pruebas de compresión a temperatura ambiente

Las pruebas de compresión a temperatura ambiente son de gran importancia para así analizar el comportamiento del material en distintas condiciones como la de tratada térmicamente y el comportamiento del material después de ser sometido a altas temperaturas por un tiempo prolongado.

Para realizar estos ensayos se estableció un límite de carga, al observar que ninguna probeta llegaba a un punto de ruptura, se programó la máquina para que dejara de aplicar fuerza a los 90KN, esto por cuestión de seguridad del equipo. Las condiciones de ensayo son las que se muestran en la siguiente tabla, y son las mismas para las tres condiciones: ast cast, T6 y sobre envejecido.

La norma en la que se basan las pruebas de compresión es la norma ASTM E9, la cual especifica que el diámetro de la probeta de ser de 10mm mientras que su altura debe ser de 15mm (Figura 35). Es de gran importancia en cada paso de las pruebas no olvidar clasificar y marcar cada probeta de manera adecuada para así tener resultados confiables de cada aleación (Figura 36), Así como tener en cuenta las condiciones a las que se programa el equipo a la hora de realizar la prueba (Tabla 5).



Note: 1—Specimen 3, because of its smaller diameter, is especially suitable for tests in which rapid heating is desired.

Figura 35. Dimensiones de las muestras circulares recomendadas.





Figura 36. Probetas clasificadas para ser sometidas a pruebas de compresión a temperatura ambiente.

Tabla 5. Condiciones de ensayo- pruebas de compresión a temperatura ambiente

Velocidad de compresión	4mm/min
Temperatura	Ambiente
Límite de carga	90 KN

Las probetas de compresión cilíndricas en las condiciones de As Cast, tratadas térmicamente y sobre envejecidas, fueron ensayadas en máquina universal SHIMADZU a temperatura ambiente, con capacidad de 100kN con un desplazamiento de 2mm/min, en la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ).

### 3.9.1 Pruebas de compresión a temperatura ambiente – As cast

Primeramente, se probaron las probetas en condición as cast, en este caso se tomaron dos muestras de cada aleación para tener mayor certeza de los resultados.

### 3.9.2 Pruebas de compresión a temperatura ambiente – T6

Enseguida se realizaron los ensayos de compresión a temperatura ambiente de las muestras tratadas térmicamente, cabe, mencionar que el tratamiento seleccionado fue T6, para este caso se ensayaron 3 probetas de cada aleación para así tener datos más precisos sobre el comportamiento de cada aleación tratada térmicamente.

### **3.9.3 Pruebas de compresión a temperatura ambiente – Sobre envejecido**

Por último, se realizaron las pruebas de compresión a temperatura ambiente de las probetas con tratamiento térmico T6 y además con un sobre envejecido de 100 horas a 250°C, para este caso se probó solo una probeta de cada aleación.

### **3.10 Pruebas de compresión a alta temperatura**

Las pruebas de compresión realizadas a alta temperatura tienen el objetivo de simular el ambiente al que estará expuesto el material en trabajo, ya que los cabezales de motor están sometidos a altas temperaturas durante toda su vida útil, es necesario verificar que el material que será propuesto para hacer esta parte vital del motor, puede resistir la fuerza necesaria en temperaturas extremas, por eso esta prueba se realizó considerando una temperatura de 250°C.

En colaboración con la Dra. Alma Graciela Esmeralda Gómez, se realizaron estas pruebas en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica en la Universidad Autónoma de Coahuila ubicada en: carretera Torreón-Matamoros, Km 7.5, Cd Universitaria, CP 27410, Torreón, Coah.

Para lo cual se utilizó una cámara ambiental instalada en la máquina universal INSTRON de tipo caja reforzada de resistencia eléctrica con dimensiones de 30x50x30 cm.

Parte del procedimiento para esta prueba se puede observar en las figuras 37, 38 y 39 que están a continuación.



Figura 37. Probetas preparadas en el horno para alcanzar la temperatura deseada y ser sometidas a compresión a alta temperatura.



Figura 38. Probeta en prensa a alta temperatura.



Figura 39. Termostato para verificar la temperatura deseada en la prueba de compresión a alta temperatura.

### 3.10.1 Pruebas de compresión a alta temperatura – Sobre envejecido

Por cuestión de perspectiva se tomó la decisión de analizar una muestra de cada aleación en condiciones de sobre envejecido, las condiciones que se tomaron en cuenta las podemos ver en la Tabla 6.

Tabla 6. Condiciones de ensayo de compresión a alta temperatura

Velocidad de compresión	2mm/min
Temperatura	250°C
Deformación	80%

### 3.11 Análisis de variables

Para la realización del análisis de variables se utilizó el programa de la marca Stat-Ease, versión: 7.1 Design-Ease.

De acuerdo a la información proporcionada en *Cómputo Científico y Técnico: software y hardware especializado*, Design-Ease es una aplicación estadística para el diseño de experimentos que ofrece un análisis en profundidad de los factores del proceso y de los componentes que intervienen. Proporciona gráficas 3D rotatable para visualizar las superficies de respuesta y contornos 2D que ayudan a identificar coordenadas y predecir respuestas. [45]

El estudio de experimento que se analizó es de tipo factorial, por lo que el uso del software ayudará a seleccionar los factores para descubrir cuales tienen mayor influencia y cómo interactúan entre sí.

## Capítulo IV Resultados

### 4.1 Presión reducida

Después de realizar el corte de la muestra, sometida a presión reducida, en el punto en el cual se podría analizar la mayor área posible, se realizó un desbaste con lijas desde el No. 150 a 1200, para observar la porosidad en el área (Figura 40).



Figura 40. Muestras sometidas a pruebas de presión reducida.

En las 9 muestras observadas se puede ver claramente la aparición de poros, por lo que podemos concluir que debería haber una mejora en el proceso de desgasificación, seguramente un medio más controlado ayudaría a reducir por completo la porosidad en las aleaciones.

## 4.2 Análisis químico

Durante la elaboración de las aleaciones, se corroboró el contenido de cada elemento en cada aleación mediante la prueba de espectrometría de emisión por chispa, antes de sacar la aleación del horno se comprobó su composición química y se ajustó el elemento en la cantidad necesaria para compensar la aleación buscada.

### 4.2.1. Espectrometría de emisión óptica (Prueba de chispa)

Los resultados de la composición química de las aleaciones realizadas en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados finales de espectrometría de emisión por chispa de las aleaciones de estudio.

Aleación	Composición química, % en peso						
	Al	Si	Cu	V	Ti	Zr	Otros
0	91.98	7.08	0.54	---	---	---	0.38
1	91.62	6.98	0.536	0.156	0.161	0.149	0.389
2	92.2	7.004	0.509	0.159	0.155	0.281	0.322
3	91.47	7.001	0.543	0.152	0.307	0.149	0.378
4	91.45	6.988	0.521	0.160	0.302	0.280	0.299
5	90.13	7.728	0.570	0.299	0.169	0.158	0.201
6	91.702	6.872	0.497	0.291	0.160	0.281	0.197
7	91.679	6.910	0.501	0.292	0.158	0.272	0.188
8	91.13	7.211	0.561	0.293	0.315	0.289	0.201

Como puede verse los resultados son muy aproximados al diseño de experimento, además, los rangos del porcentaje en peso de los elementos añadidos son lo suficientemente variables para determinar cuál elemento mejora la aleación de una forma más eficiente.

### 4.3 Caracterización metalográfica

#### 4.3.1 Microscopía óptica

Efecto del tratamiento térmico y sobre envejecido en las aleaciones.

En la Figura 41 se muestra el resultado obtenido en imagen de la microscopía óptica de la aleación 0, con un aumento de 200X en sus tres condiciones, colada, tratada térmicamente y sobre envejecida.

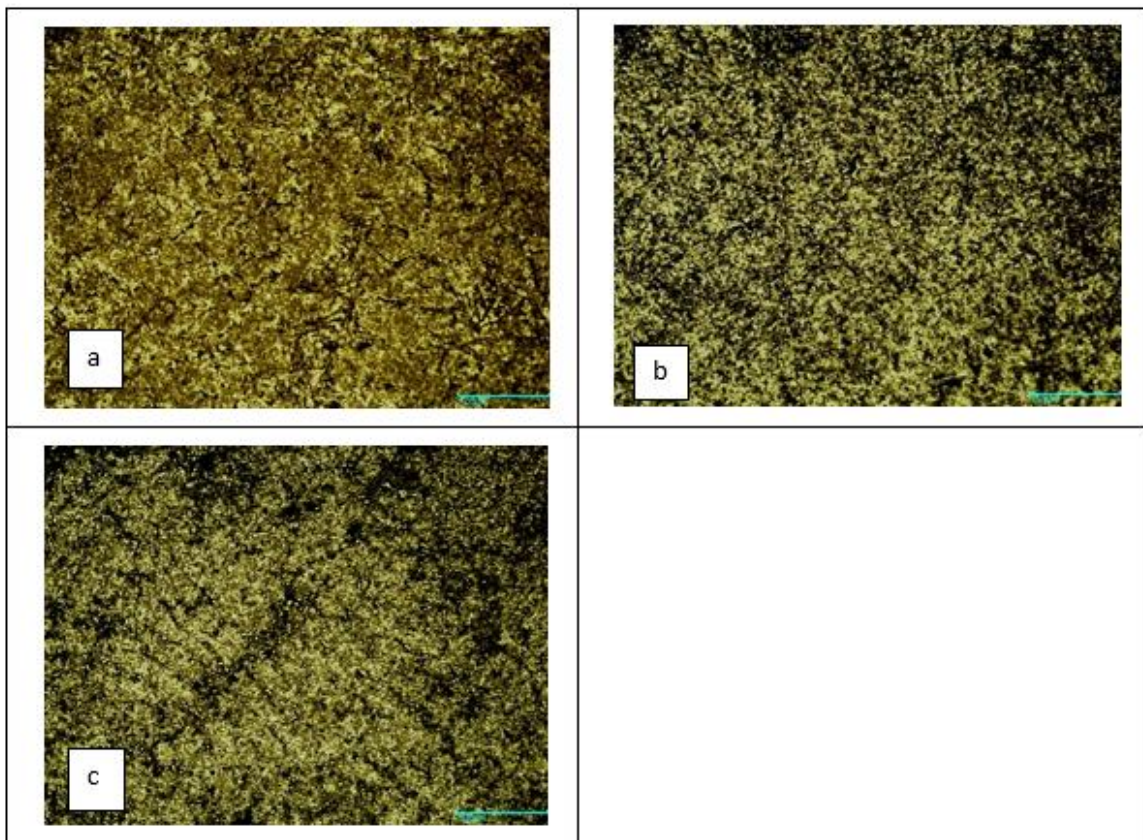


Figura 41. Aleación 0 en diversas condiciones, 200X. a) colada, b) tratada térmicamente y c) sobre envejecida.

La figura 42a muestra la micrografía óptica de la aleación base, A<sub>0</sub>, (Al-7Si-0.5Cu), que consiste en una estructura dendrítica típica de una aleación colada, con un eutéctico Al-Si con agujas de silicio. En la condición de tratamiento térmico, figura 42b, el silicio eutéctico entró en solución y las partículas de silicio que permanecen, engrosaron y esferoidizaron, debido al tratamiento por solución y envejecido. Mientras que el sobre envejecido de la aleación produjo la formación y engrosamiento del eutéctico Al-Si, Figura 42c.

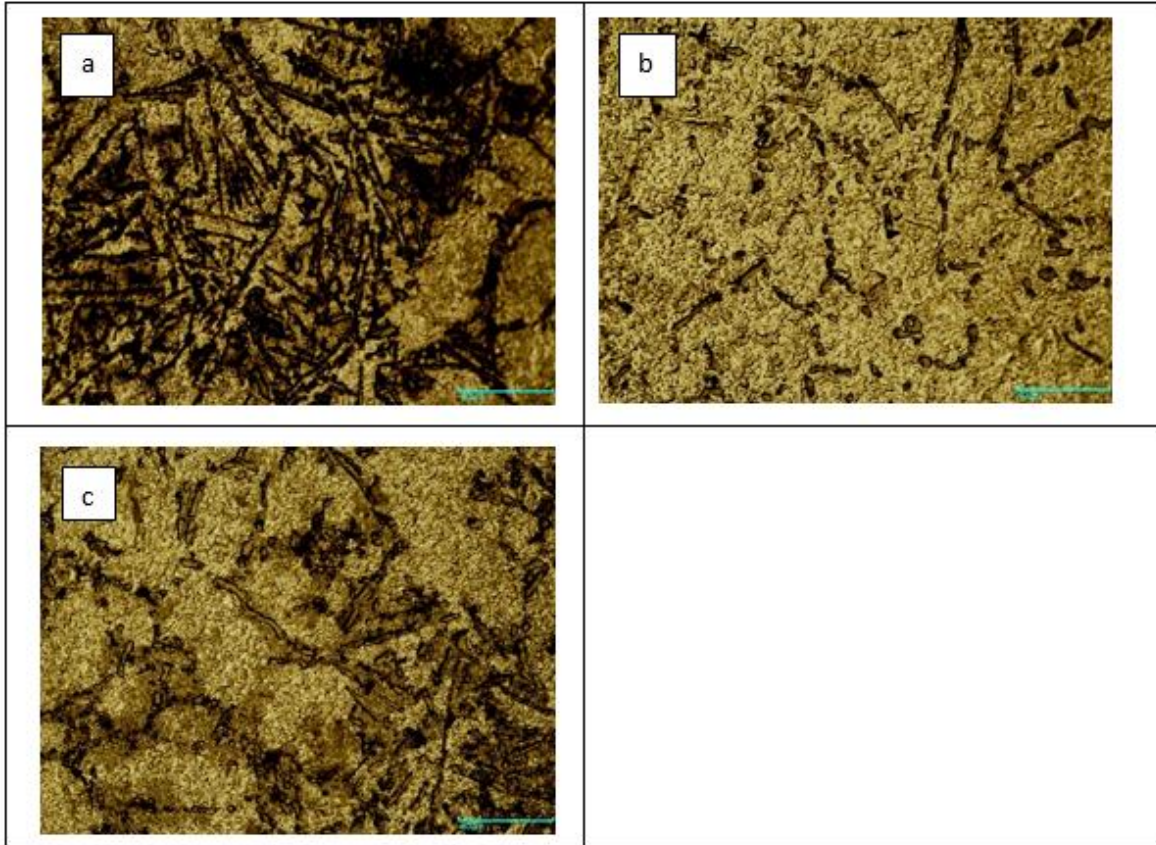


Figura 42. Aleación 0 en diversas condiciones, 500X. a) colada, b) tratada térmicamente y c) sobre envejecida.



En la Figura 43 se muestra la micrografía de la aleación 1, con un aumento de 200X en sus tres condiciones, colada, tratada térmicamente y sobre envejecida.

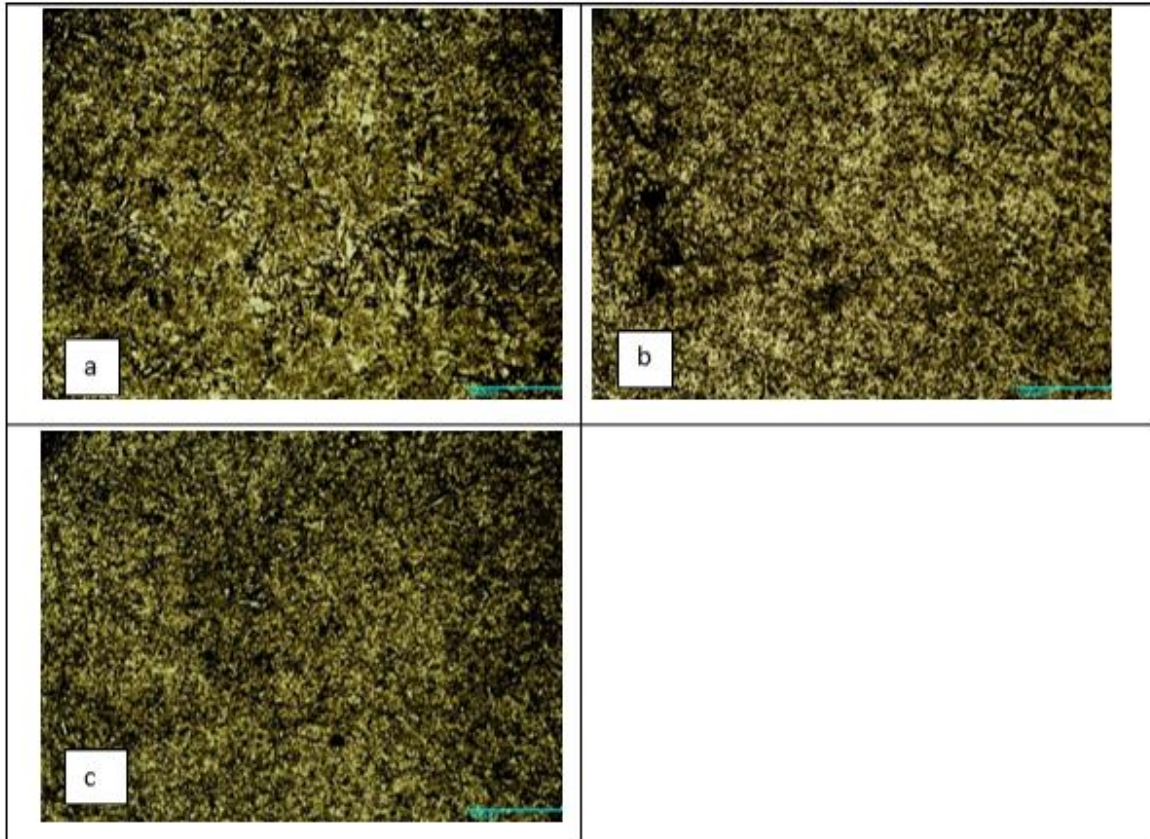


Figura 43. Aleación 1 en diversas condiciones, a 200X. a) colada, b) tratada térmicamente y c) sobre envejecida.

La figura 44a muestra la micrografía óptica de la aleación, A<sub>1</sub>, (*Al-7Si-0.5Cu con 0.15V, 0.15Ti y 0.15Zr*) que consiste en una estructura dendrítica típica de una aleación colada, con un eutéctico Al-Si con agujas de silicio. En la condición de tratamiento térmico, figura 44b, el silicio eutéctico entró en solución y las partículas de silicio que permanecen, engrosaron y esferoidizaron, debido al tratamiento por solución y envejecido. Para el sobre envejecido (100 h a 250°C), de esta aleación, con 0.15V, 0.15Ti y 0.15Zr, las partículas de silicio eutéctico permanecen pequeñas y redondeadas, comparadas con la condición de tratamiento térmico. Figura 44c. Al parecer la presencia de esos elementos, Ti, V y Zr detiene el crecimiento de las partículas Al-Si, durante el sobre envejecido. Lo que no ocurrió en la aleación base A<sub>0</sub>.

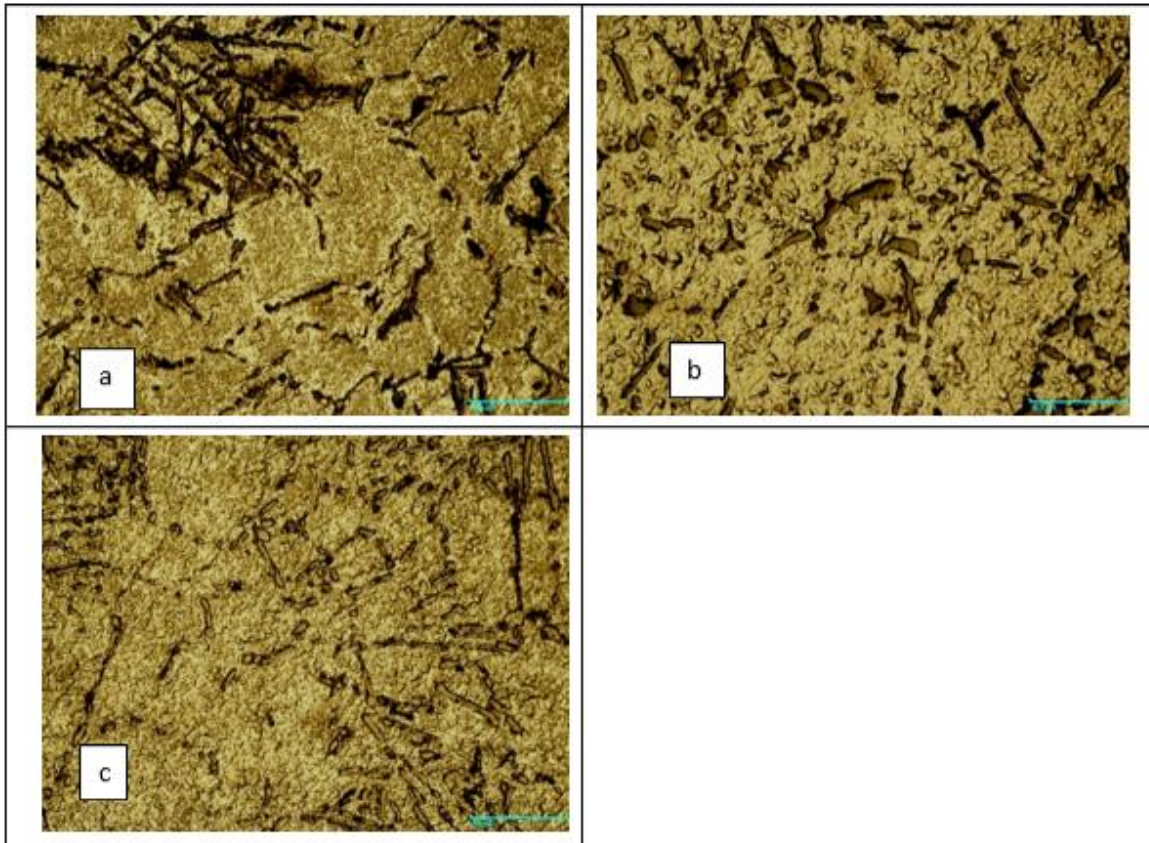


Figura 44. Aleación 1 en diversas condiciones, a 500X. a) colada, b) tratada térmicamente y c) sobre envejecida.

En la Figura 45 se muestra la micrografía de la aleación 4, con un aumento de 200X en sus tres condiciones, colada, tratada térmicamente y sobre envejecida.

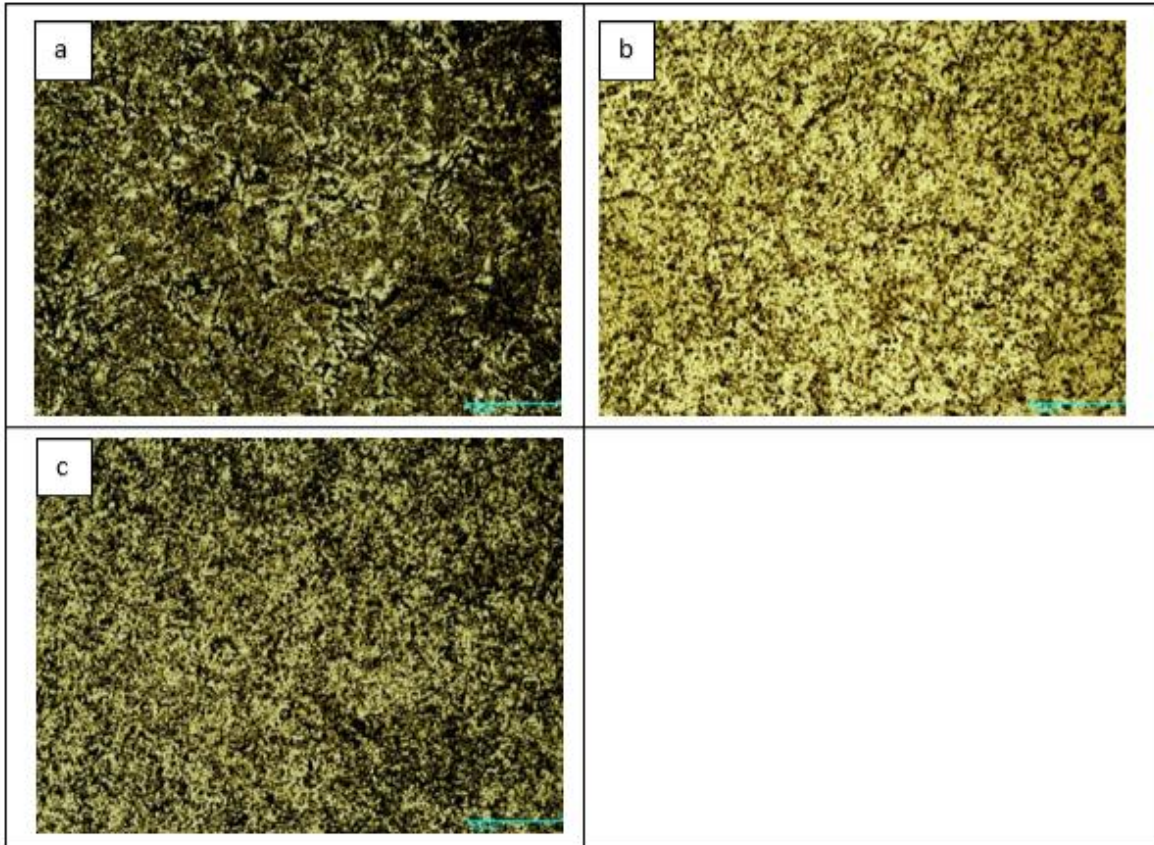


Figura 45. Aleación 4 en diversas condiciones, a 200X. a) colada, b) tratada térmicamente y c) sobre envejecida.

La figura 46a muestra la micrografía óptica de la aleación,  $A_4$ , ( $Al-7Si-0.5Cu$  con  $0.15V$ ,  $0.30Ti$  y  $0.30Zr$ ), que consiste en una estructura dendrítica típica de una aleación colada, con un eutéctico Al-Si con agujas de silicio. En la condición de tratamiento térmico, figura 46b, gran parte del silicio eutéctico entró en solución y el total de las partículas de silicio en forma de aguja, desaparecieron debido al tratamiento por solución y envejecido. Para el sobre envejecido (100 h a  $250^{\circ}C$ ), de esta aleación, con  $0.15V$ ,  $0.30Ti$  y  $0.30Zr$ , las partículas de silicio eutéctico permanecen finas y redondeadas, comparadas con la condición de tratamiento térmico. Figura 46c. Al parecer la presencia de esos elementos, Ti, V y Zr, en mayor contenido que en la aleación A1, detiene el crecimiento de las partículas Al-Si, durante el sobre envejecido.

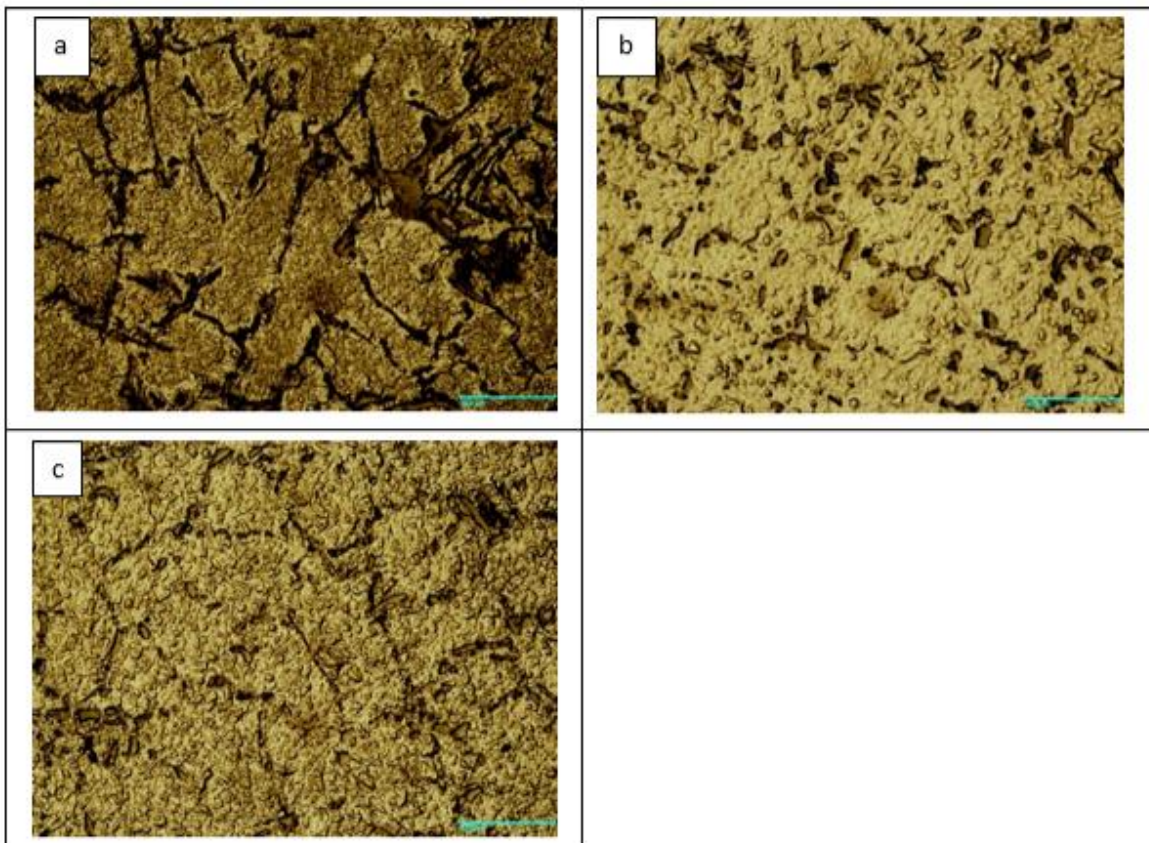


Figura 46. Aleación 4 en diversas condiciones, a 500X. a) colada, b) tratada térmicamente y c) sobre envejecida.

En la Figura 47 se muestra la micrografía de la aleación 8 con un aumento de 200X en sus tres condiciones, colada, tratada térmicamente y sobre envejecida.

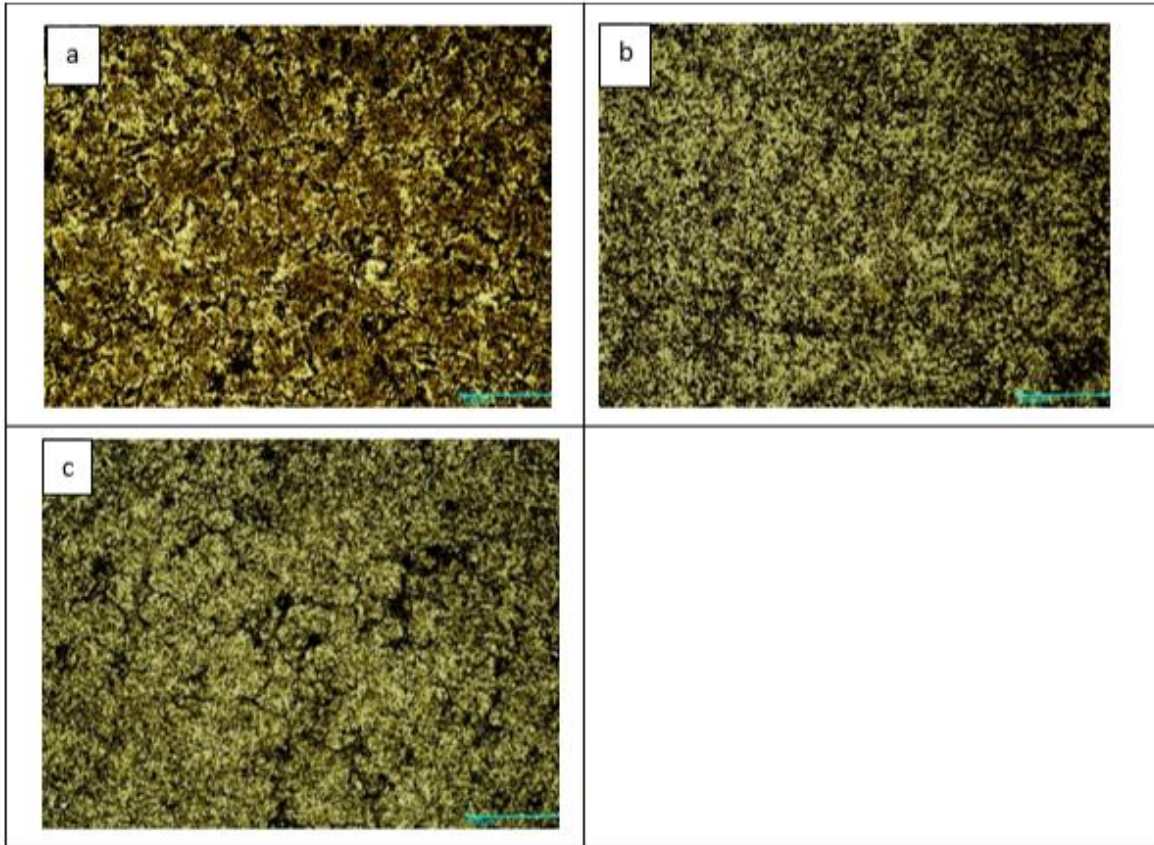


Figura 47. Aleación 8 en diversas condiciones, a 200X. a) colada, b) tratada térmicamente y c) sobre envejecida.

La figura 48a muestra la micrografía óptica de la aleación, A8, (*Al-7Si-0.5Cu con 0.30V, 0.30Ti y 0.30Zr*). En la condición de tratamiento térmico, figura 48b, gran parte del silicio eutéctico entró en solución. Para el sobre envejecido (100 h a 250°C), de esta aleación, con 0.30V, 0.30Ti y 0.30Zr, las partículas de silicio eutéctico son un poco mayores en tamaño, comparadas con la condición de tratamiento térmico. Figura 48c. Al parecer la presencia de esos elementos, Ti, V y Zr, en mayor contenido que en la aleación A4, no detuvo el crecimiento de las partículas Al-Si, durante el sobre envejecido, como ocurrió en la aleación A4.

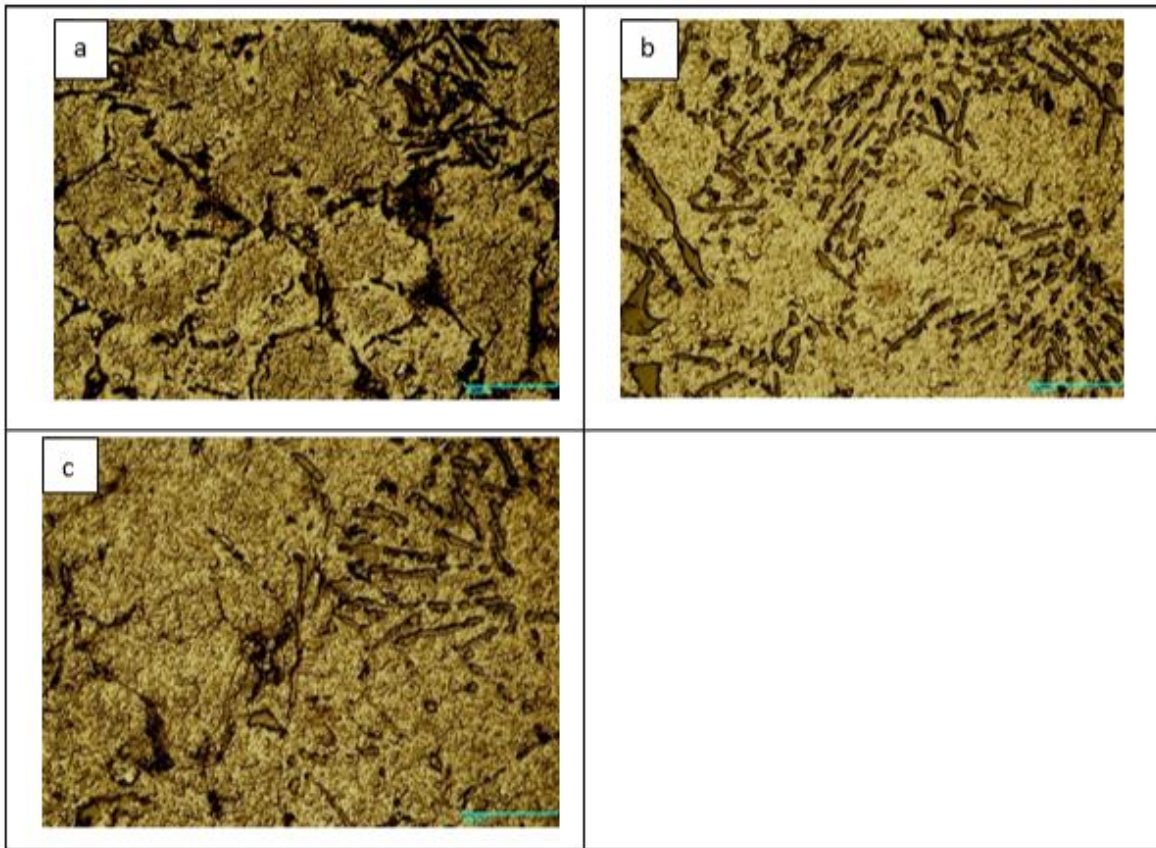


Figura 48. Aleación 8 en diversas condiciones, a 500X. a) colada, b) tratada térmicamente y c) sobre envejecida.

Efecto de la composición química en la microestructura.

La figura 49a muestra la micrografía óptica de la aleación base, A<sub>1</sub>, que consiste en una estructura dendrítica típica de una aleación colada, con un eutéctico Al-Si con gran cantidad de agujas de silicio. Adicionar elementos, *V*, *Ti* y *Zr*, en general, reduce la presencia de agujas de silicio en el eutéctico Al-Si. Figuras 49c-d.

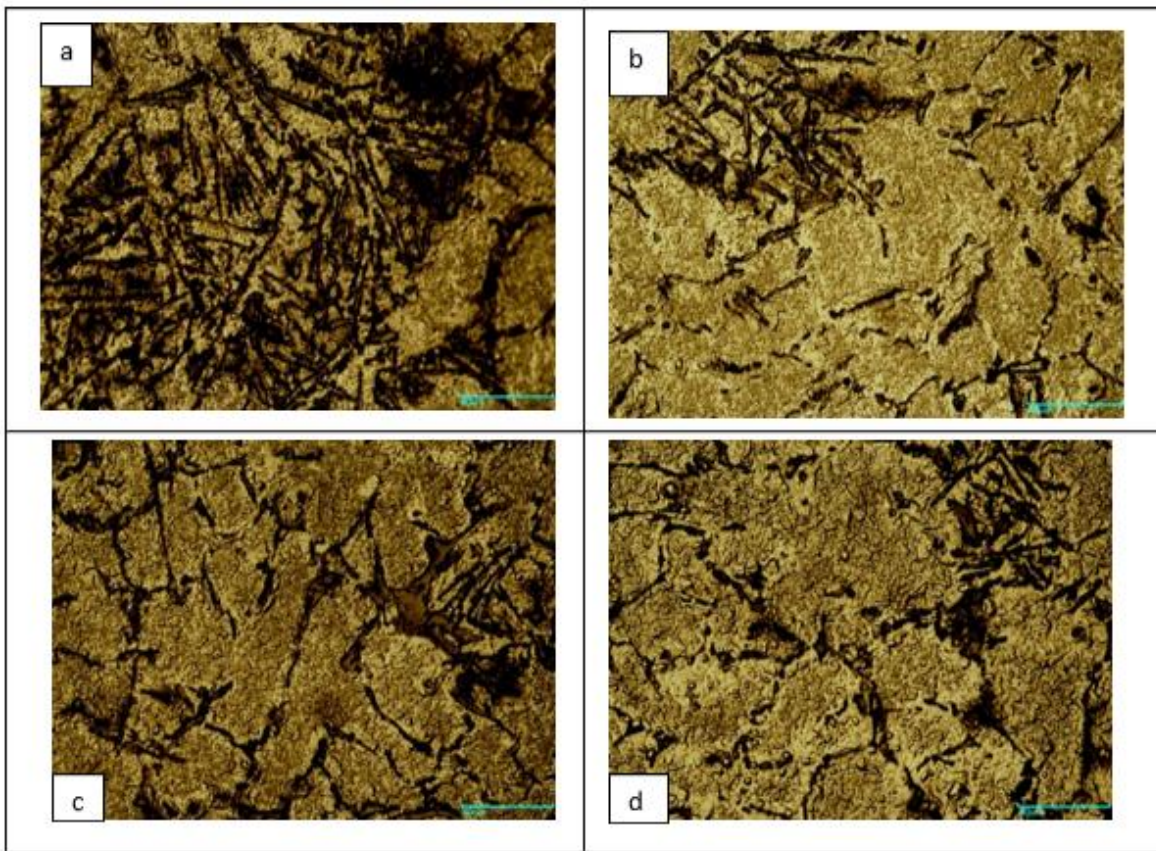


Figura 49. Micrografía de las aleaciones en condición colada, a 500X, a) Aleación A0, b) aleación A1, c) aleación A4 y d) aleación A8.

La figura 50a muestra la micrografía óptica de la aleación base, A0, que consiste en red interdendrítica de silicio eutéctico, algunas partículas aún alargadas. El añadir elementos aleantes Ti V y Zr, modificó el tamaño y forma de las partículas de silicio eutéctico, en la condición de tratamiento térmico. Es en la aleación A4, con  $0.15V$ ,  $0.30Ti$  y  $0.30Zr$ , que se tienen las partículas de silicio, más finas y homogéneamente distribuidas. Figura 50c.

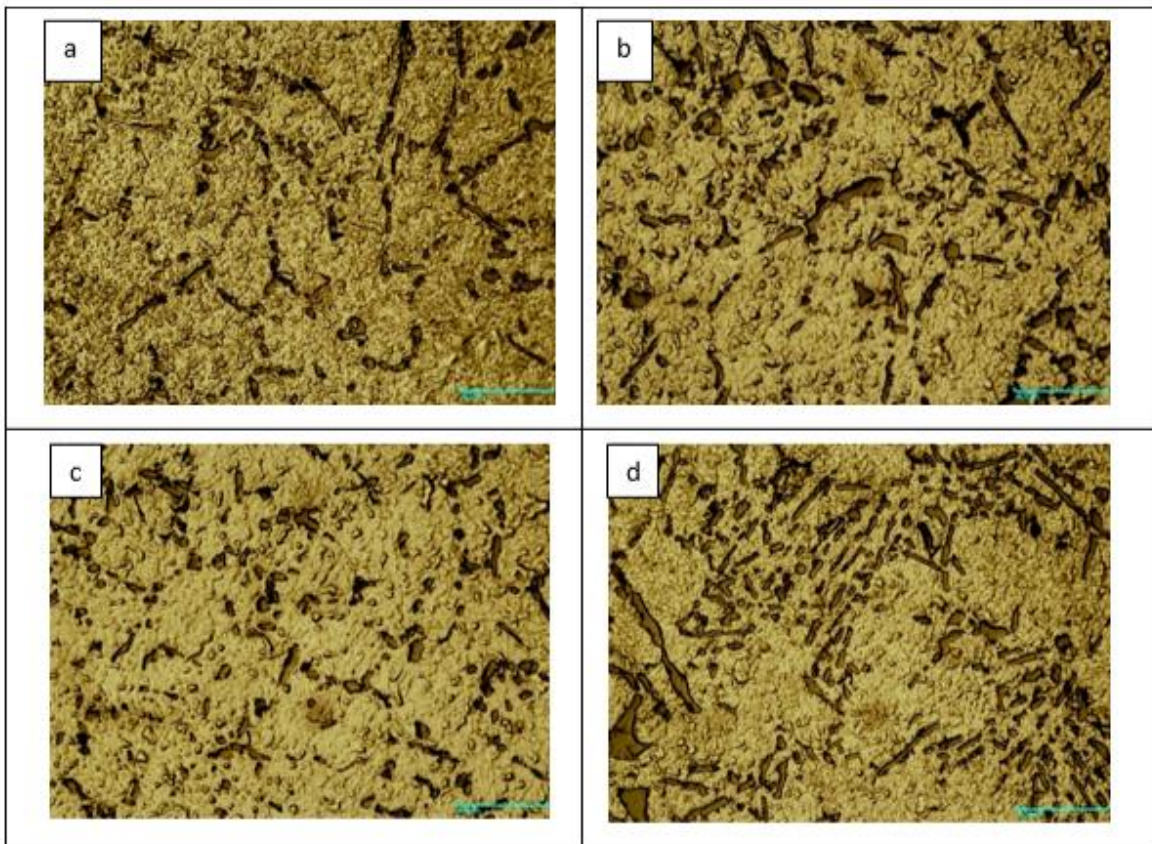


Figura 50. Micrografía de las aleaciones en condición tratada térmicamente, a 500X, a) aleación A0, b) aleación A1, c) aleación A4 y d) aleación A8.



La figura 51a muestra la micrografía óptica de la aleación base, A0, sobre envejecida, que consiste de red interdendrítica de silicio eutéctico grueso, la imagen está sobre atacada químicamente, el efecto de añadir elementos como el V, Ti y Zr tiene un efecto muy notable en el tamaño y forma de las partículas de silicio eutéctico. La adición particular de 0.15V, 0.30Ti y 0.30Zr, aleación A4, ocasionó una microestructura muy fina de partículas de silicio eutéctico, posterior al envejecido 100 h, a 250°C. Lo que seguramente favorecerá su comportamiento mecánico.

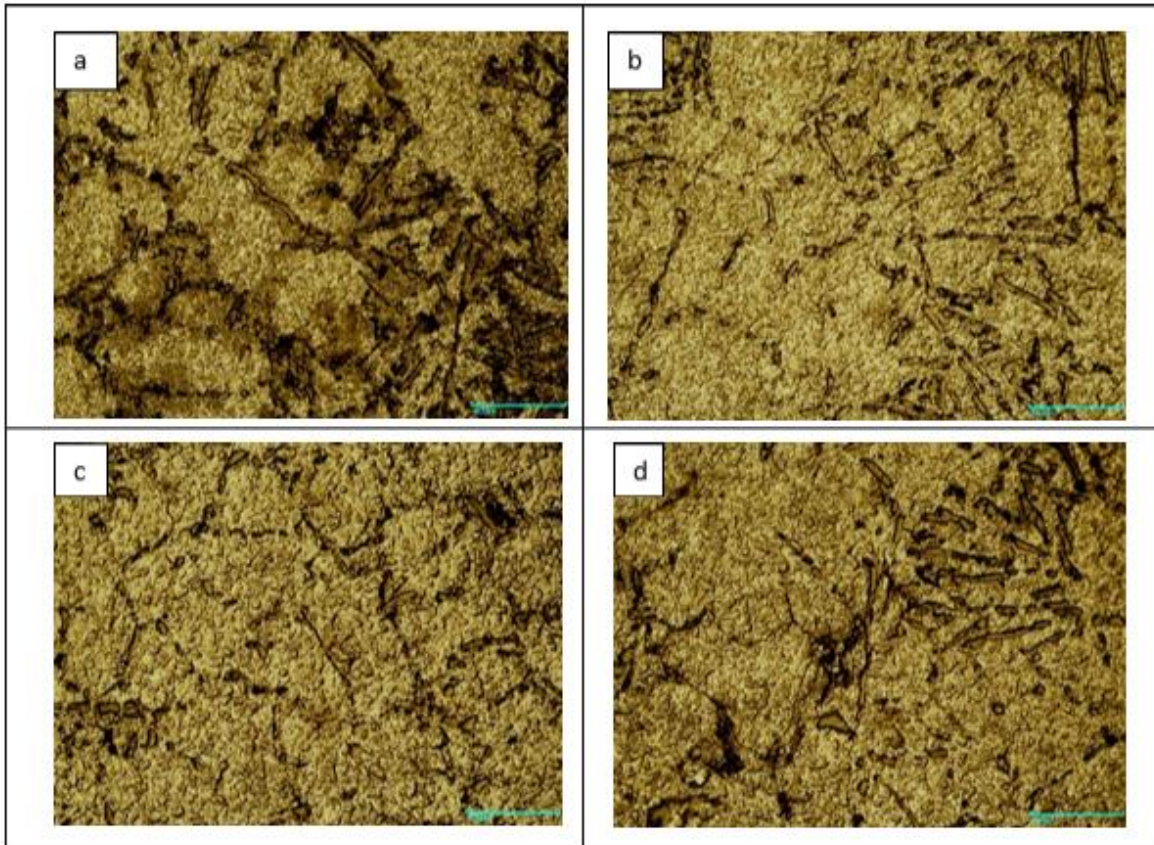


Figura 51. Micrografía de las aleaciones sobre envejecidas, a 500X, a) Aleación A0, b) aleación A1, c) aleación A4 y d) aleación A8.

En resumen: la adición de V, Ti y Zr en la aleación A0, modifica el tamaño y morfología del silicio eutéctico en la condición de colado, lo que se traducirá en una microestructura fina y dispersa en las condiciones de tratamiento térmico y muy en particular en la condición de sobre envejecido. Es notable observar que esta adición de elementos retiene el crecimiento de partículas de silicio eutéctico durante el sobre envejecido, mejorando con certeza su comportamiento mecánico en esa condición.

### 4.3.2 Caracterización de fases y elementos mediante difracción de rayos x (DRX)

Con la información obtenida en el difractómetro de rayos X, se realizaron las gráficas correspondientes a cada aleación y observaron los picos y su posición, mediante diversas bases de datos se encontraron las fases presentes en cada una y el plano en el que se encuentran, a continuación, se presentan las gráficas de cada una de las aleaciones (Figuras 52-63).

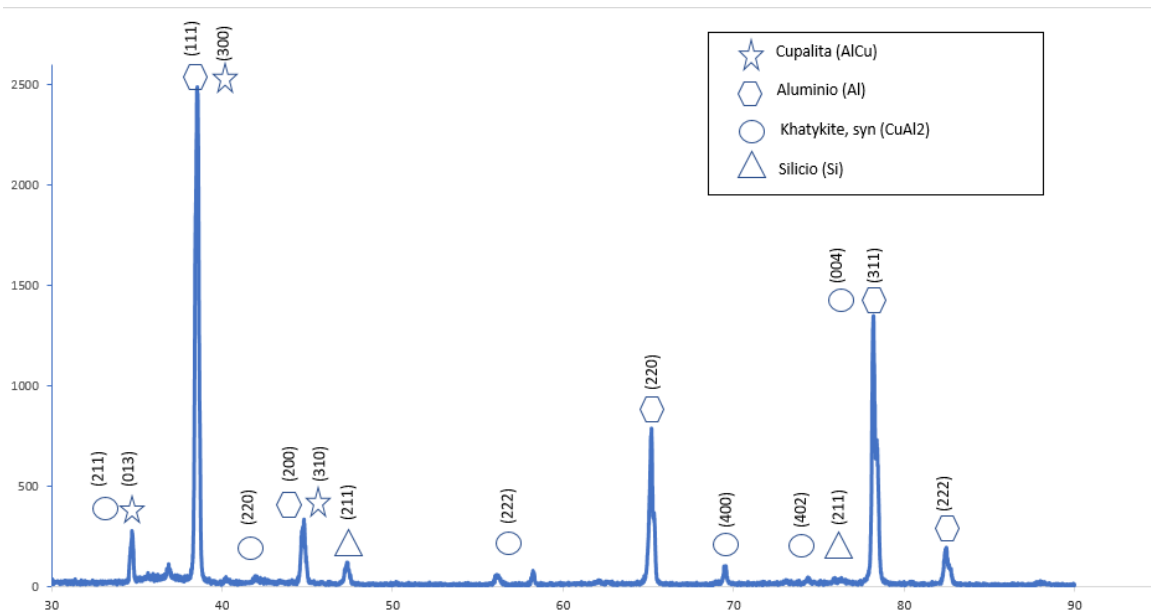


Figura 52. Fases encontradas en la aleación 0 en condición As Cast, mediante el método de difracción de rayos x.

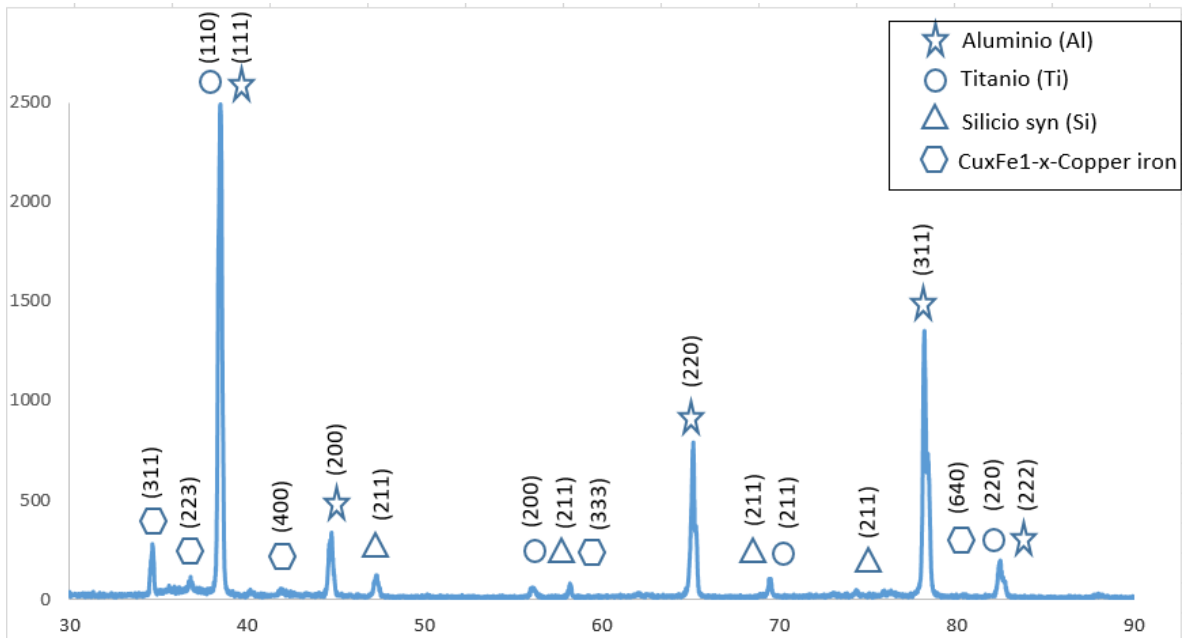


Figura 53. Fases encontradas en la aleación 1 en condición As Cast, mediante el método de difracción de rayos x.

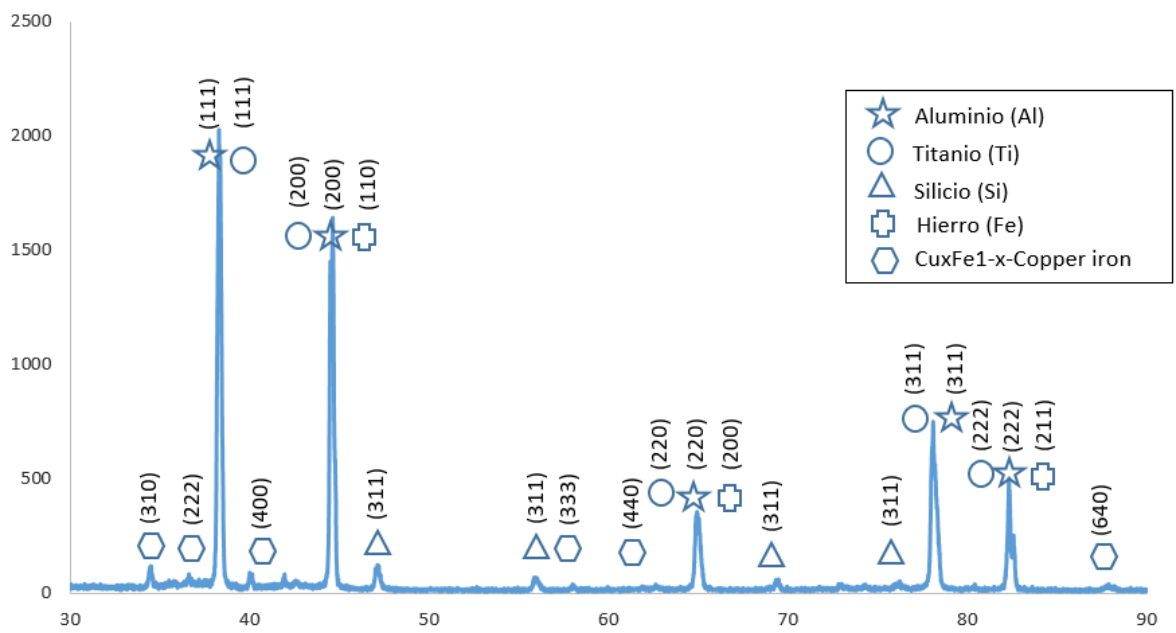


Figura 54. Fases encontradas en la aleación 4 en condición As Cast, mediante difracción de rayos x.

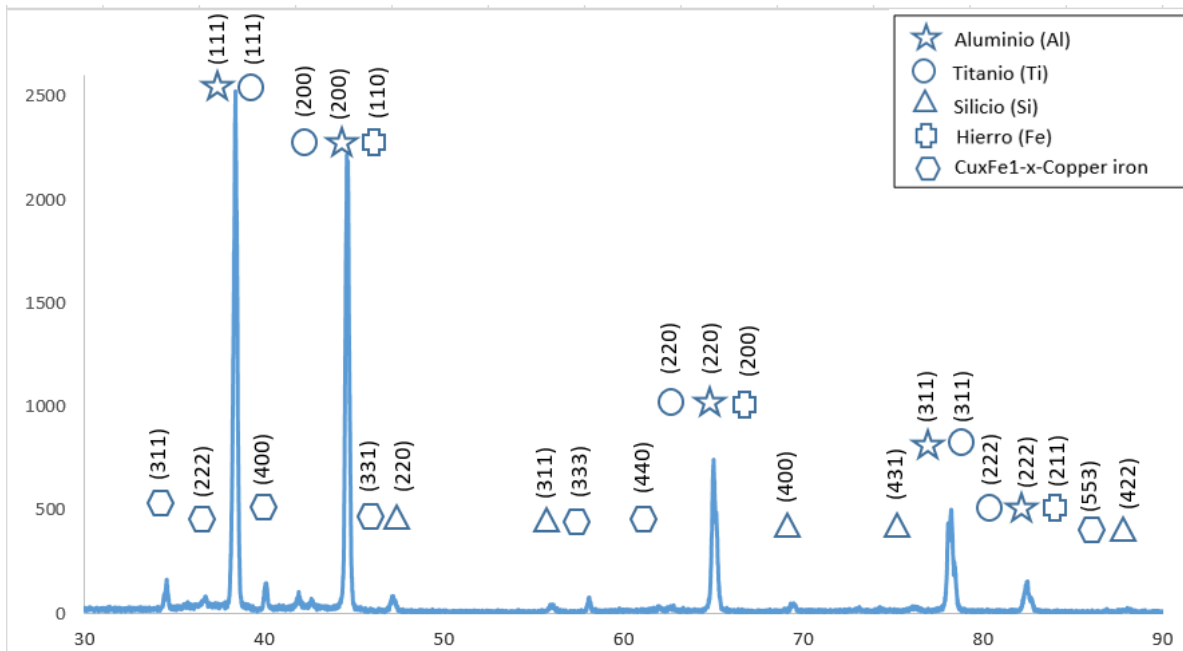


Figura 55. Fases encontradas en la aleación 8 en condición As Cast, mediante difracción de rayos x.

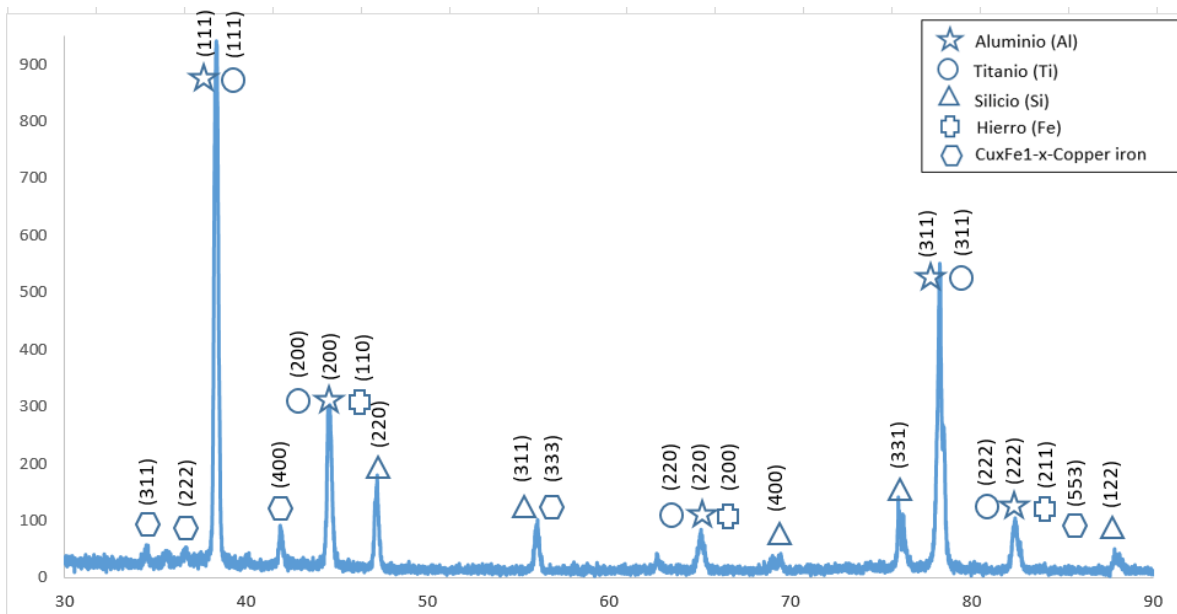


Figura 56. Fases encontradas en la aleación 0 tratada térmicamente (T6), mediante difracción de rayos x.

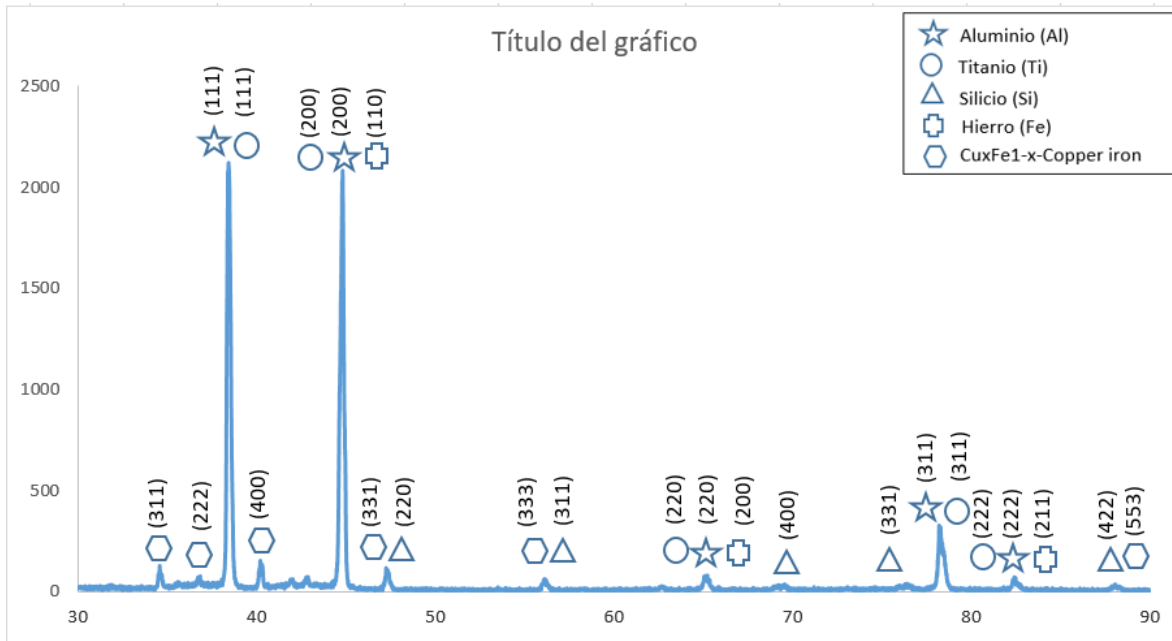


Figura 57. Fases encontradas en la aleación 1 tratada térmicamente (T6), mediante difracción de rayos x.

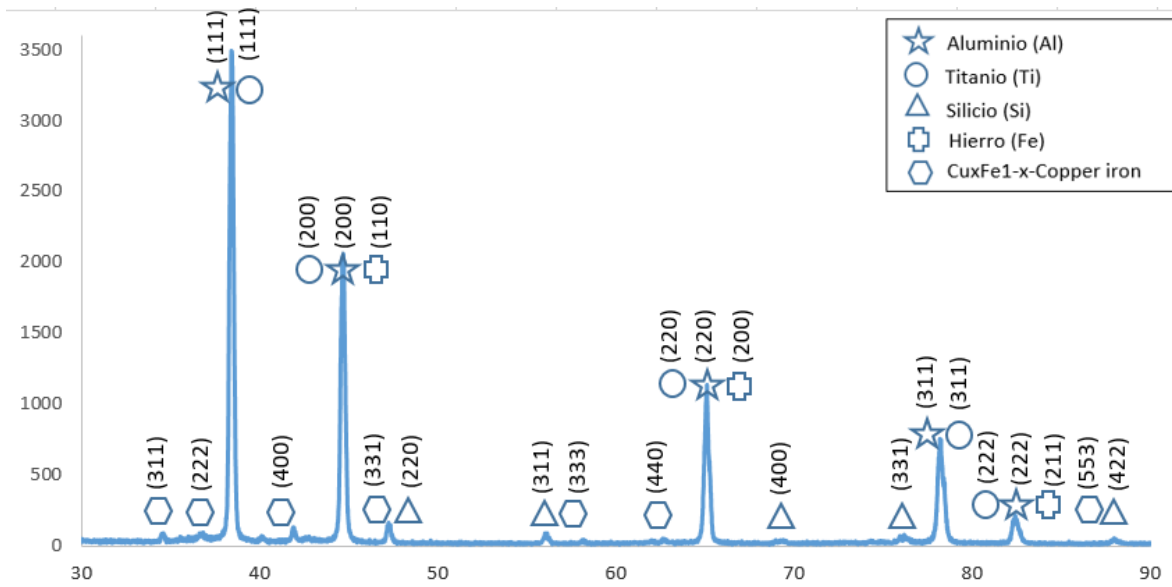


Figura 58. Fases encontradas en la aleación 4 tratada térmicamente (T6), mediante difracción de rayos x.

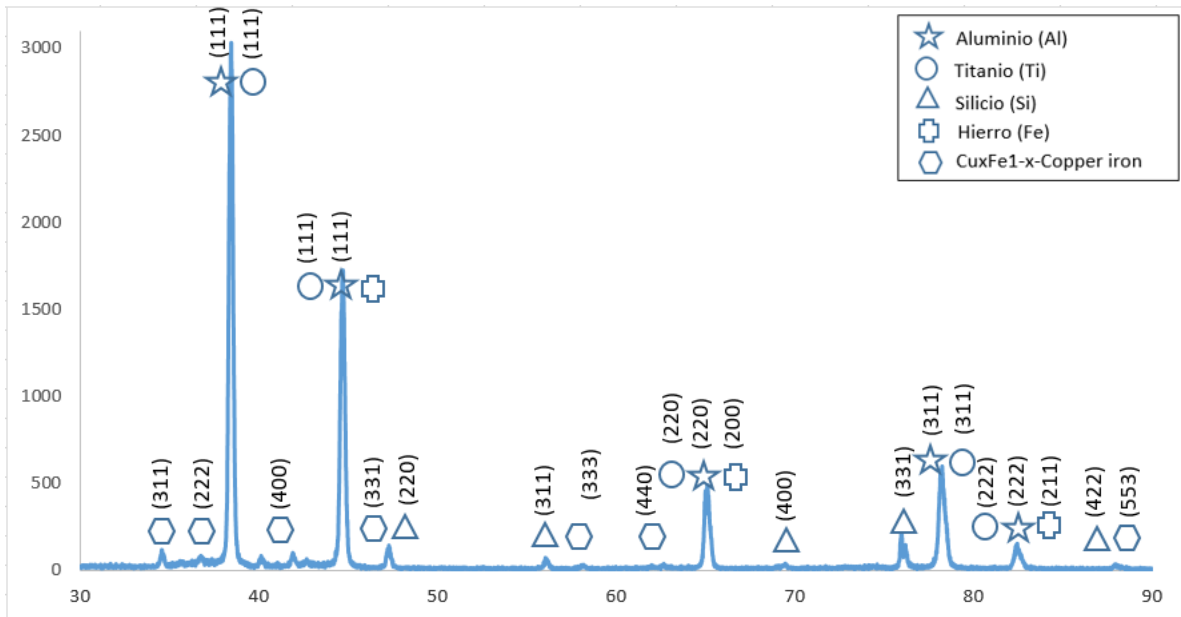


Figura 59. Fases encontradas en la aleación 8 Tratada térmicamente (T6), mediante difracción de rayos x.

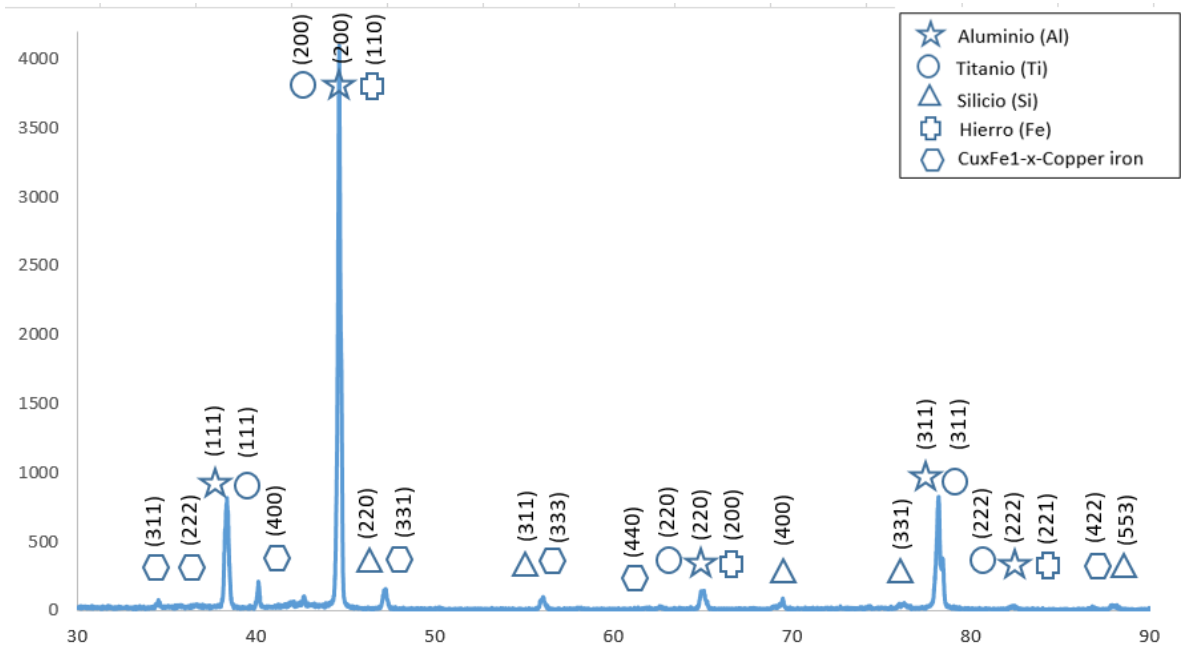


Figura 60. Fases encontradas en la aleación 0 en condición de sobre envejecido, mediante difracción de rayos x.

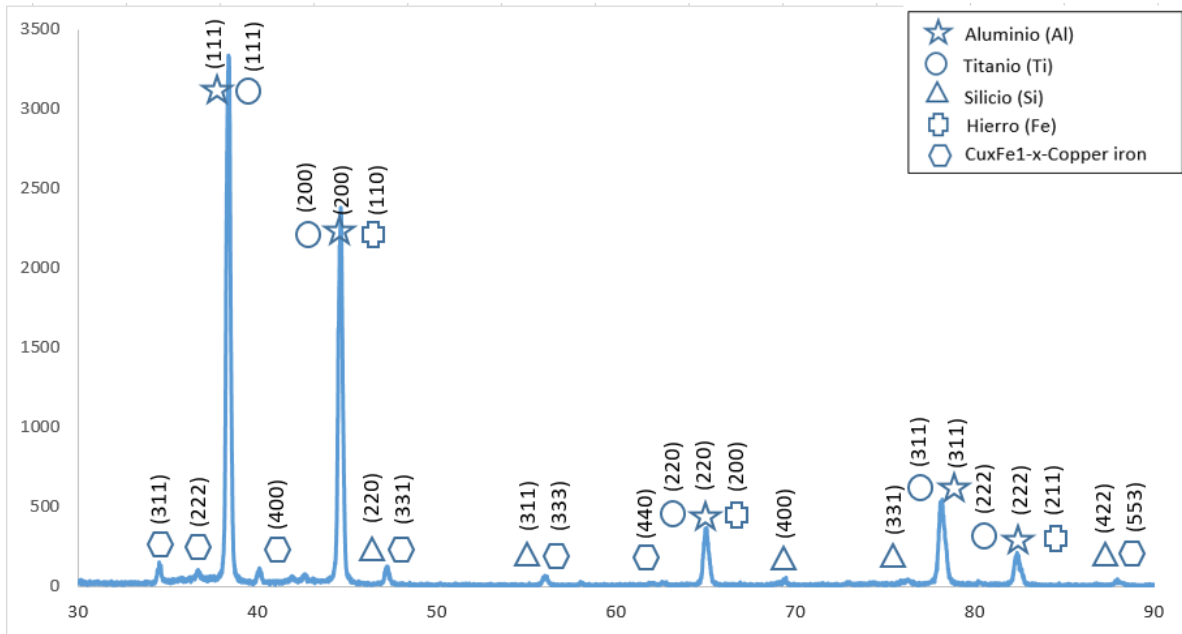


Figura 61. Fases encontradas en la aleación 1 en condición de sobre envejecido, mediante difracción de rayos x.

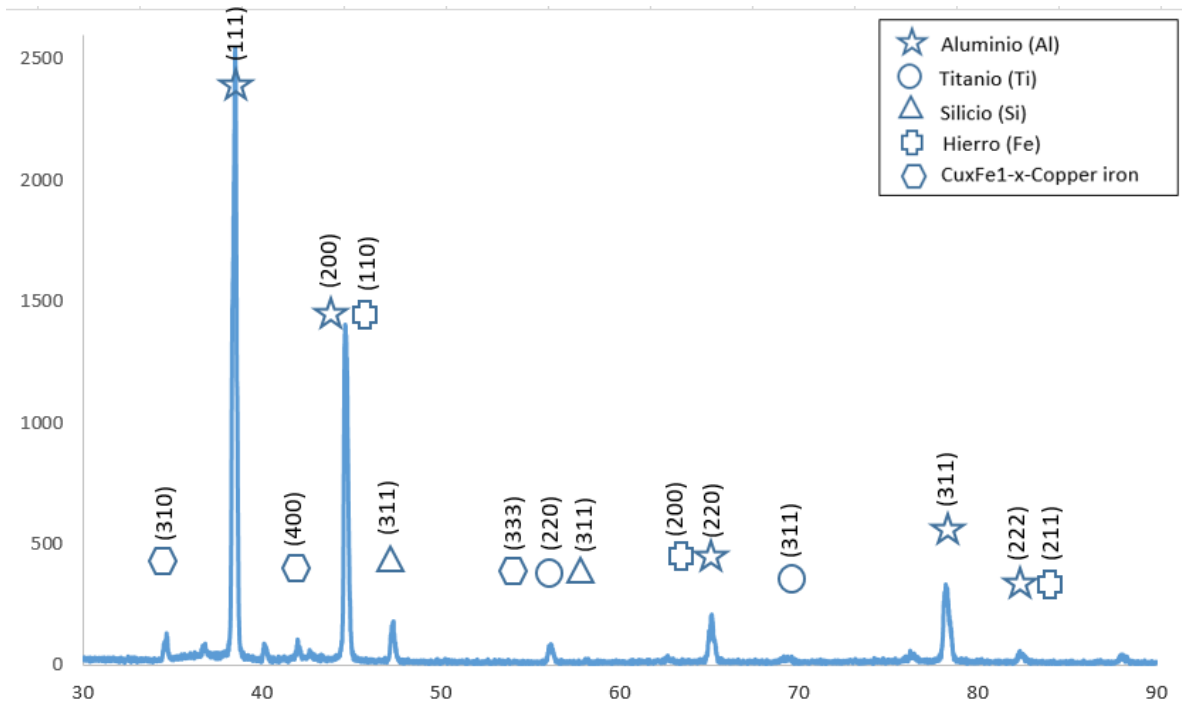


Figura 62. Fases encontradas en la aleación 4 en condición de sobre envejecido mediante, difracción de rayos x.

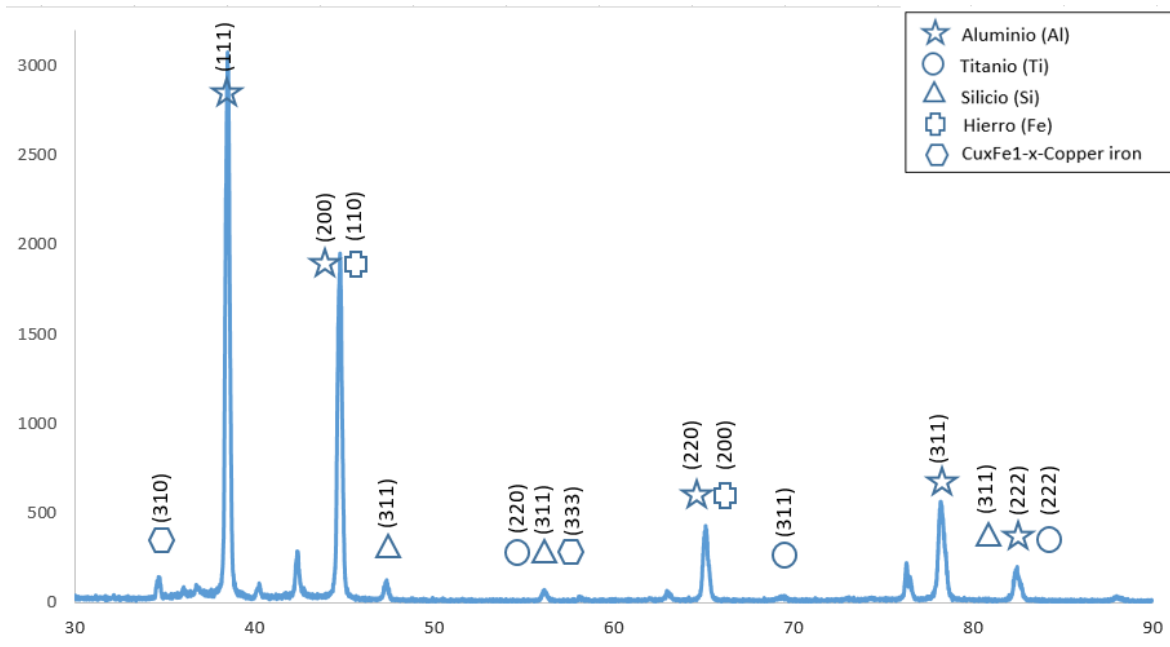


Figura 63. Fases encontradas en la aleación 8 en condición de sobre envejecido, mediante difracción de rayos x.

En resumen, los resultados de difracción de rayos X, son similares para todas las aleaciones con elementos añadidos, V, Ti y Zr ya que podemos encontrar básicamente las mismas fases, en los mismos planos con una variabilidad mínima de las intensidades en los picos de cada una, la única aleación que podemos observar con una diferencia es la aleación base, la cual presenta, además, las fases AlCu y CuAl<sub>2</sub>.

Es decir, el tratamiento térmico ni el sobre envejecido, propició la formación de otras fases, solo modificaron su morfología, tamaño y su distribución en la matriz. El análisis por difracción de rayos X no mostró la presencia de fases con V, Ti y Zr, quizá debido a su bajo porcentaje.

Debido a los elementos añadidos a la aleación Al-7Si-0.5Cu, las fases encontradas en este estudio son totalmente congruentes para las composiciones micro estructurales de las aleaciones estudiadas, enseguida en la Tabla 8 podemos observar el resumen de las fases encontradas.



Tabla 8. Fases principales encontradas en las aleaciones experimentales, mediante DRX.

Aleación	Fases principales		
	Colada	TT	Sobre envejecida
0	Al, AlCu, CuAl <sub>2</sub> , Si	Fe, Al, Ti, Si, CuFe	Fe, Al, Ti, Si, CuFe
1	Al, Ti, Si, CuFe	Fe, Al, Ti, Si, CuFe	Fe, Al, Ti, Si, CuFe
4	Fe, Al, Ti, Si, CuFe	Fe, Al, Ti, Si, CuFe	Fe, Al, Ti, Si, CuFe
8	Fe, Al, Ti, Si, CuFe	Fe, Al, Ti, Si, CuFe	Fe, Al, Ti, Si, CuFe

### 4.3.3 Caracterización de fases mediante Espectroscopía de rayos x de energía dispersiva (EDX).

El análisis por EDX de las aleaciones en condición de colado se muestran en las figuras 64-69. La aleación A0, (Al-7Si-0.5Cu), presentó tres fases principales: Si eutéctico, partículas de *AlSiFeCu* y *AlSiCu*, en una matriz de Al. Figura 64.

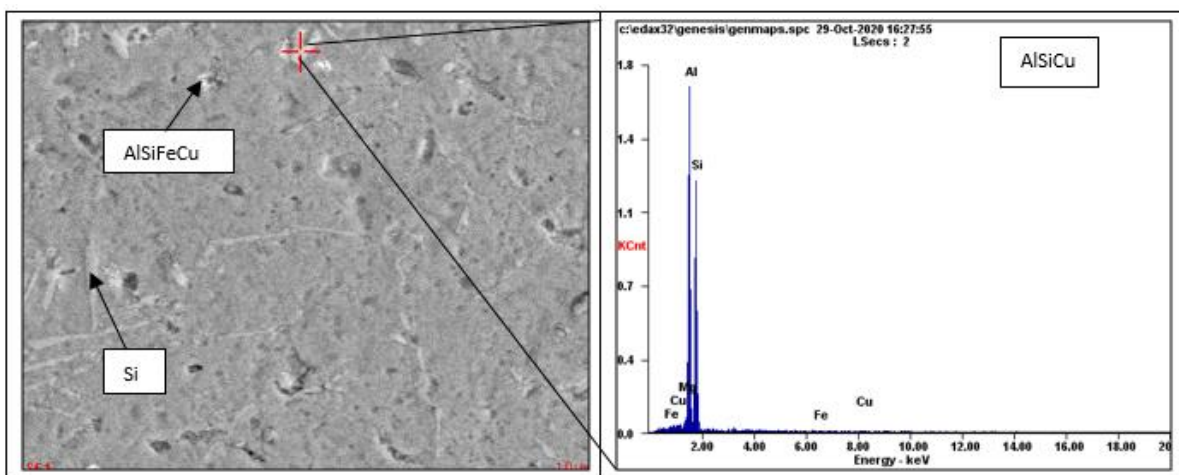


Figura 64. Análisis por EDX de fases en la aleación 0, condición colada.

Mientras que la aleación 1, (Al-7Si-0.5Cu con 0.15V, 0.15Ti y 0.15Zr), presenta fases blancas brillantes de  $AlCu$  y otra de  $AlSiFeCuZr$ , en una matriz de Al con solución sólida de Si, V, Ti, Fe, Cu y Zr (trazas). Figura 65.

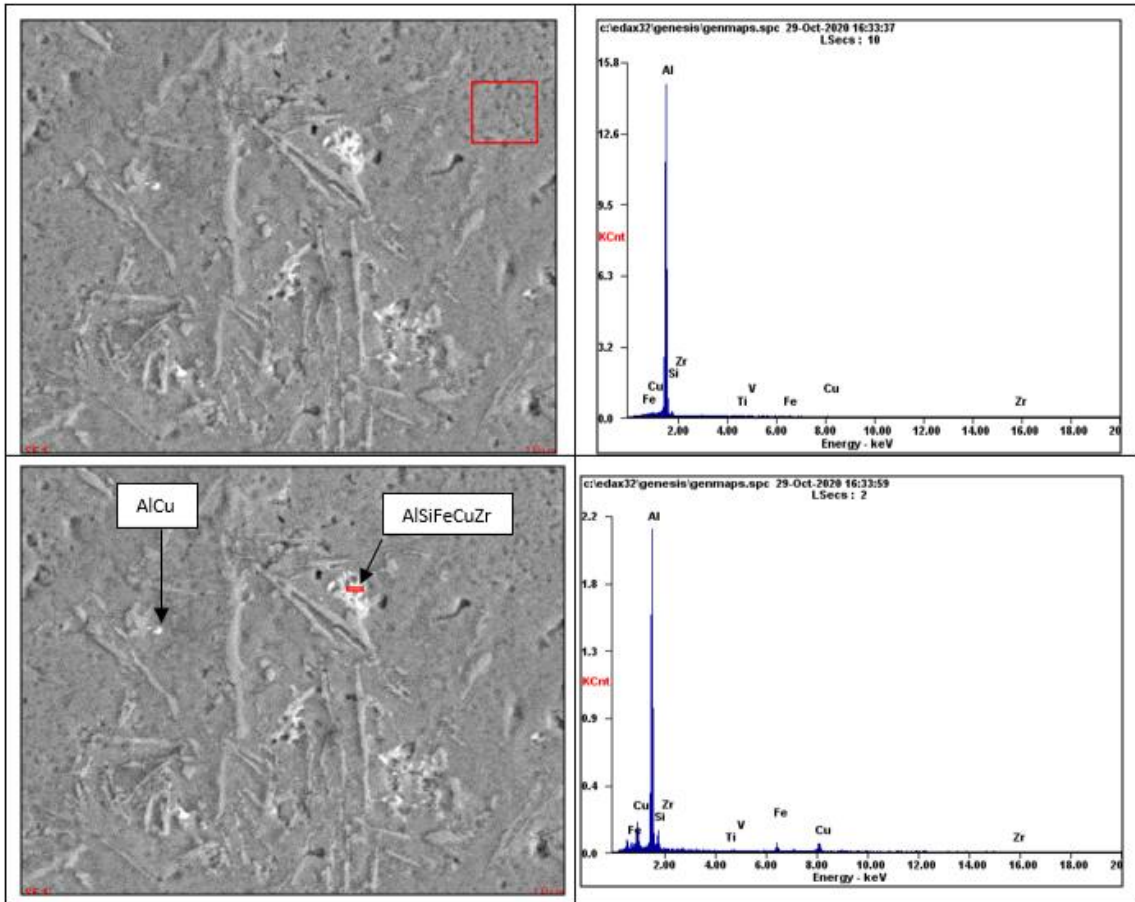


Figura 65. Análisis por EDX de fases en la aleación 1, condición colada.

Aquí podemos ver el mapeo realizado mediante la caracterización de fases mediante Espectroscopía de rayos x de energía dispersiva de la aleación 1 en condición as cast (Figura 66).

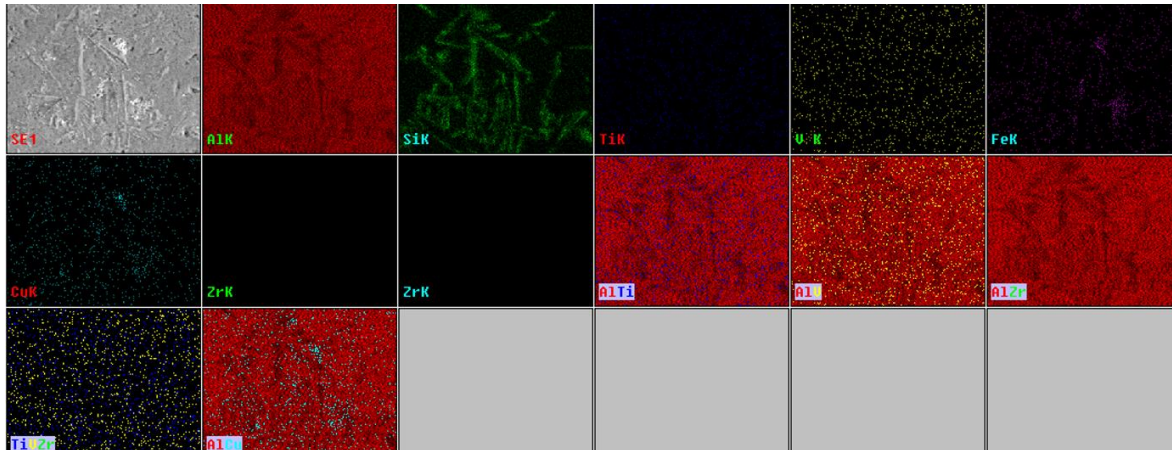


Figura 66. Mapeo de elementos importantes en la aleación 1, colada.

La aleación 4, (Al-7Si-0.5Cu con 0.15V, 0.30Ti y 0.30Zr), presentó fases blancas brillantes de forma irregular del tipo AlSiFeCuZr, otras de AlSiFeCu con trazas de V y Ti, AlSiCu, AlSiZr y Si eutéctico, como muestra las figuras 67 y 68.

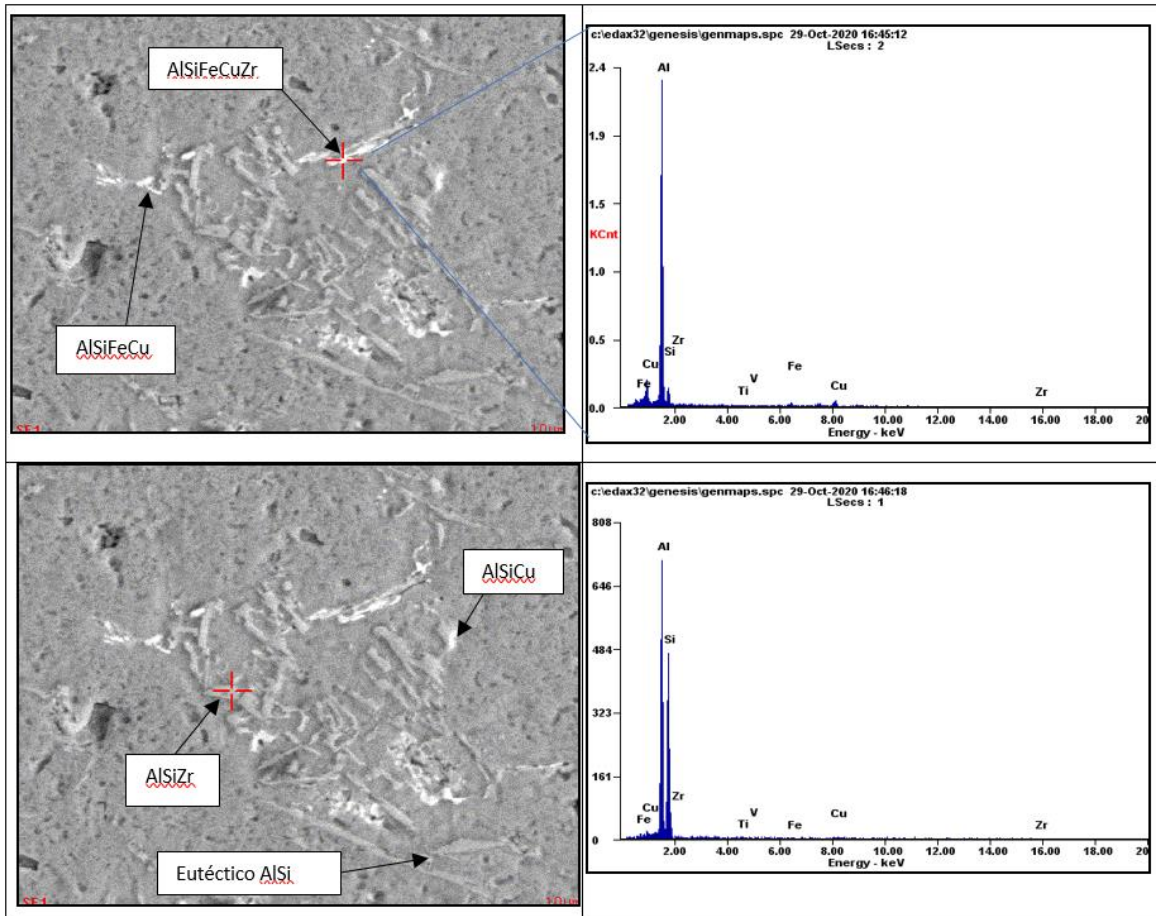


Figura 67. Análisis por EDX de fases en la aleación 4, condición colada.

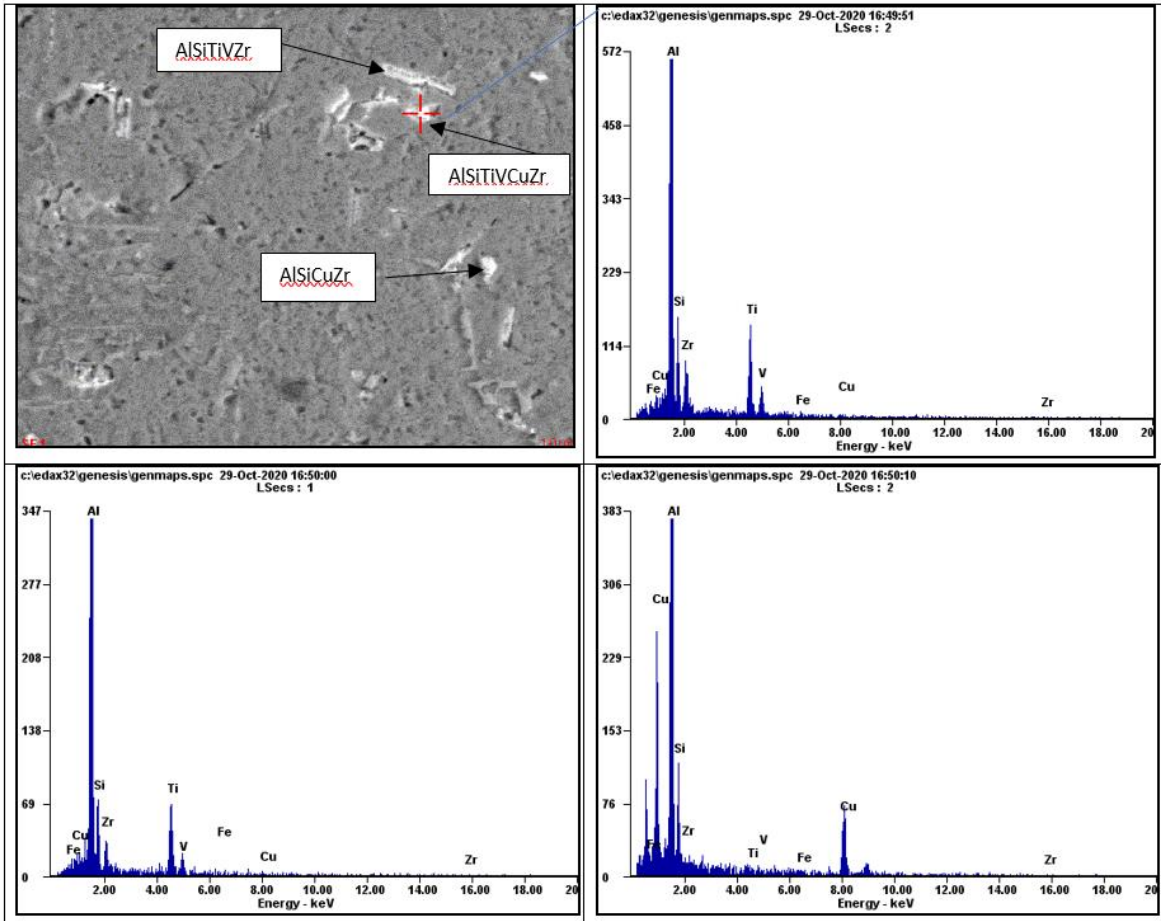


Figura 68. Análisis por EDX de fases en la aleación 4, otra zona, condición colada.

La observación en otra zona de esta misma aleación, 4, presentó fases del tipo  $\text{AlSiVCuZr}$ ,  $\text{AlSiTiVZr}$  y  $\text{AlSiCuZr}$ .

Ahora podemos ver el mapeo realizado mediante la caracterización de fases mediante Espectroscopía de rayos x de energía dispersiva de la aleación 4 en condición as cast (Figura 69).

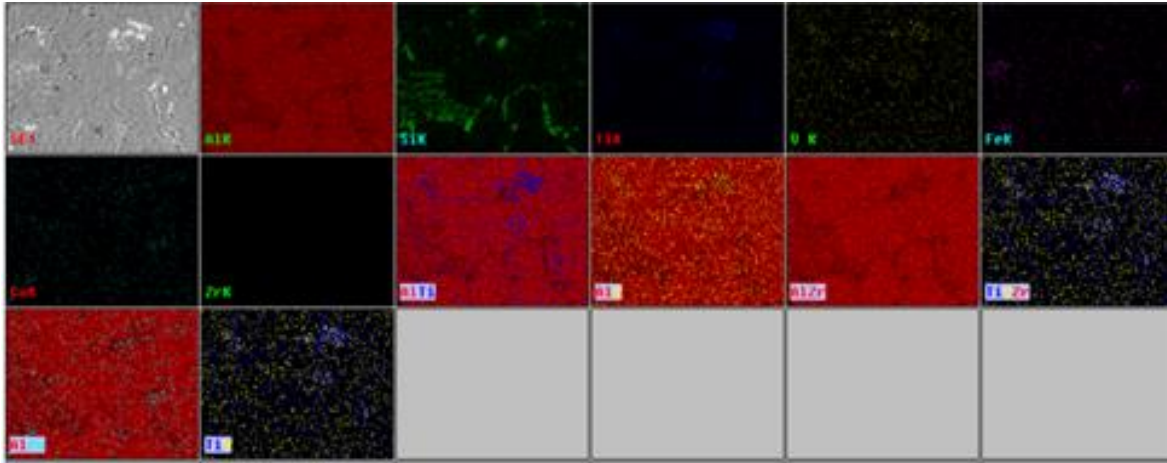


Figura 69. Mapeo de elementos importantes en la aleación 4, colada.

En la condición tratada térmicamente, la aleación 0, (Al-7Si-0.5Cu), pequeñas fases brillantes, en trazas, del tipo AlSiFeCu principalmente y una pequeña partícula de AlSiFeCuZr, con una traza de Zr quizá por contaminación. Figura 70.

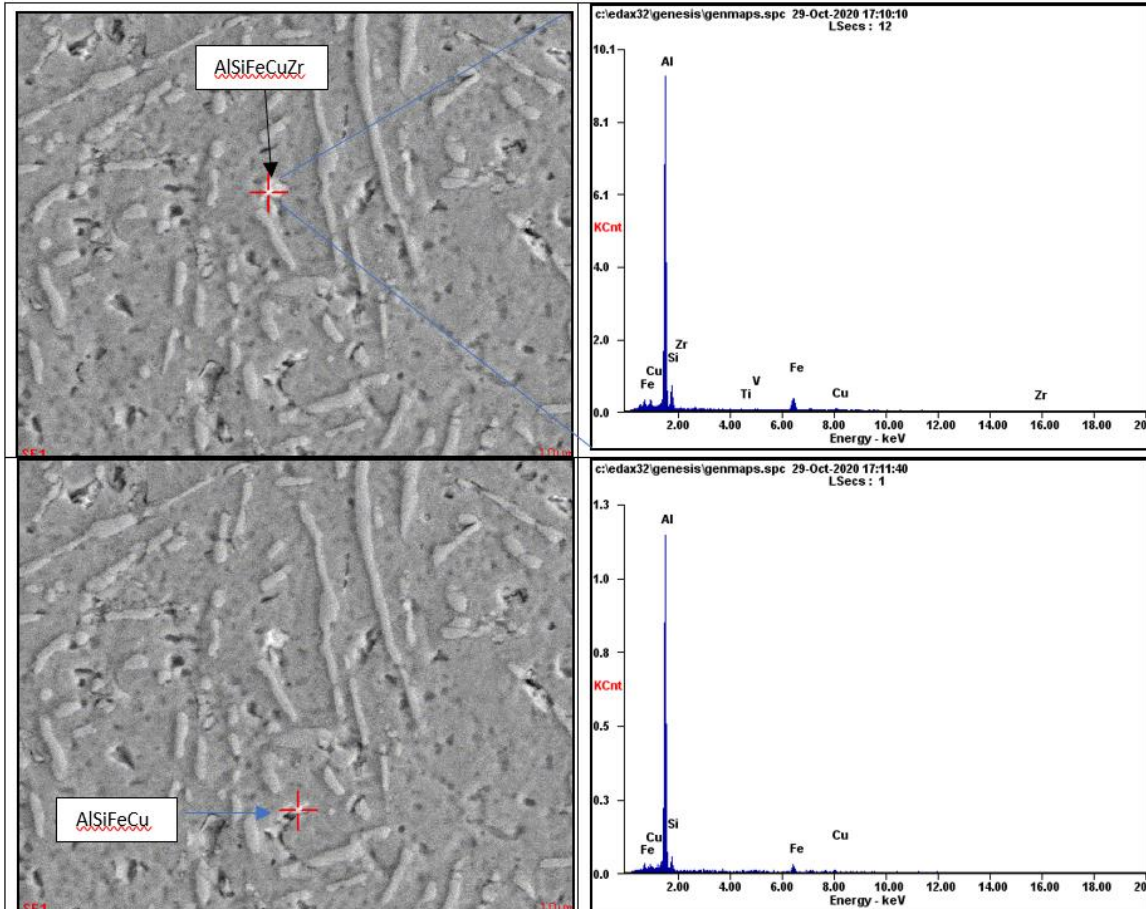


Figura 70. Análisis por EDX de fases en la aleación 0, condición tratada térmicamente.

En la aleación 1, ( $Al-7Si-0.5Cu$  con  $0.15V$ ,  $0.15Ti$  y  $0.15Zr$ ), tratada térmicamente se presentaron fases  $AlSiZr$  y  $AlSiFeCuZr$ , como en su condición colada. Figura 71.

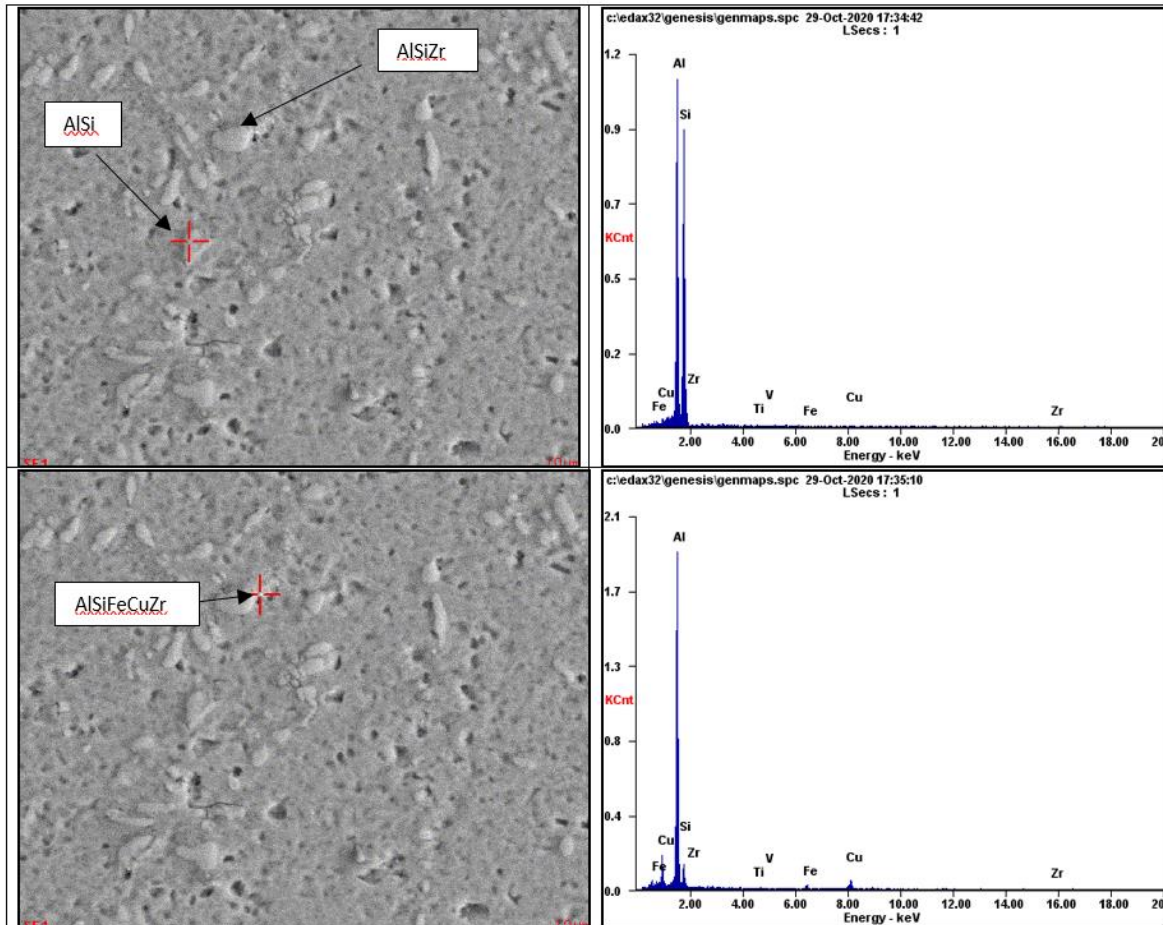


Figura 71. Análisis por EDX de fases en la aleación 1, condición tratada térmicamente.



En la siguiente imagen podemos ver el mapeo realizado mediante la caracterización de fases mediante espectroscopía de rayos x de energía dispersiva de la aleación 1 tratada térmicamente (Figura 72).

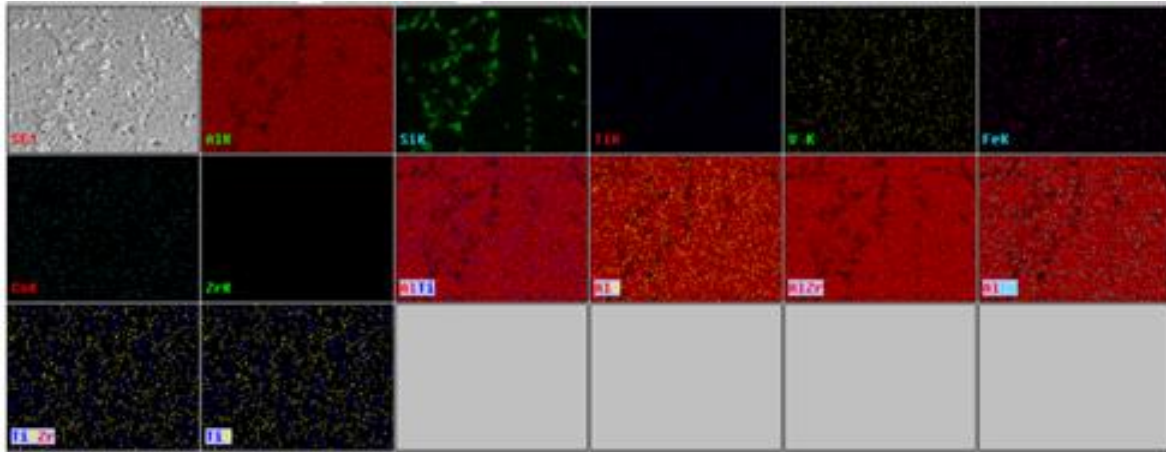


Figura 72. Mapeo de elementos importantes en la aleación 1, tratada térmicamente.

Por lo que respecta a la aleación 4, (*Al-7Si-0.5Cu con 0.15V, 0.30Ti y 0.30Zr*), tratada, se observaron partículas brillantes y gruesas, de *AlSiTiVZr*, además de *AlSiZr*, en la matriz de Al. Figura 73.

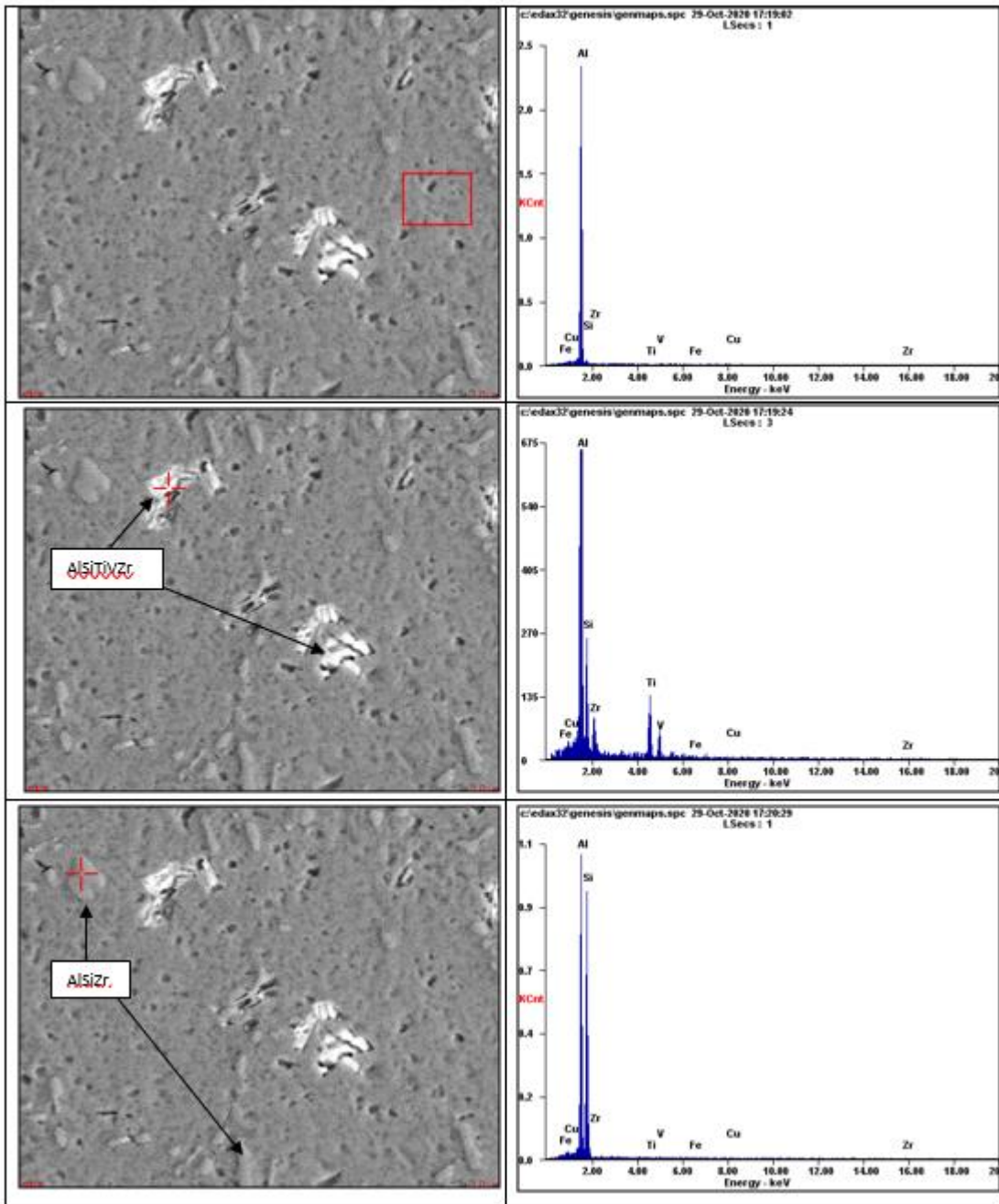


Figura 73. Análisis por EDX de fases en la aleación 4, condición tratada térmicamente.

Aquí podemos ver el mapeo realizado mediante la caracterización de fases mediante Espectroscopía de rayos x de energía dispersiva de la aleación 4 tratada térmicamente (Figura 74).

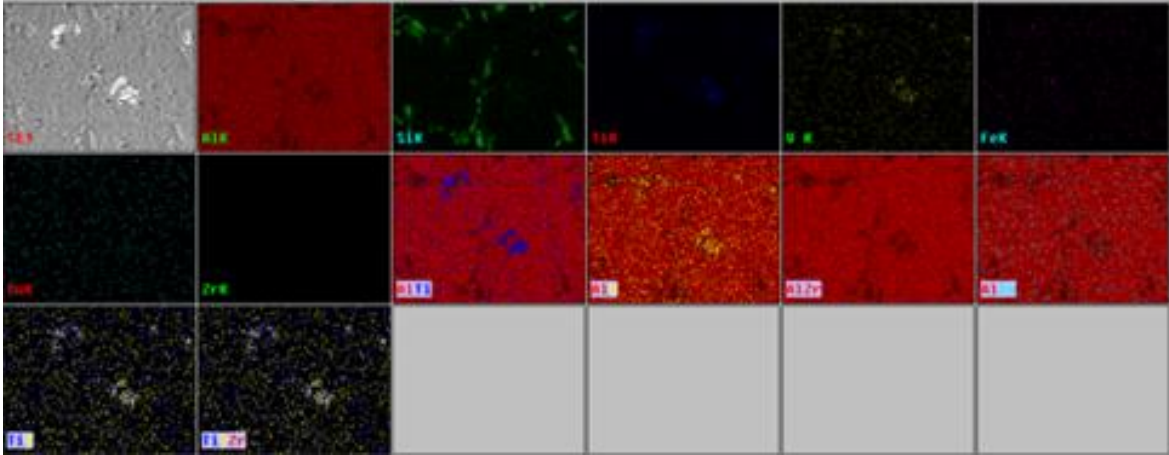


Figura 74. Mapeo químico en la aleación 4, tratada térmicamente.

En esta condición, la aleación 0, solo presentó Si eutéctico, en un matriz de Al.  
Figura 75.

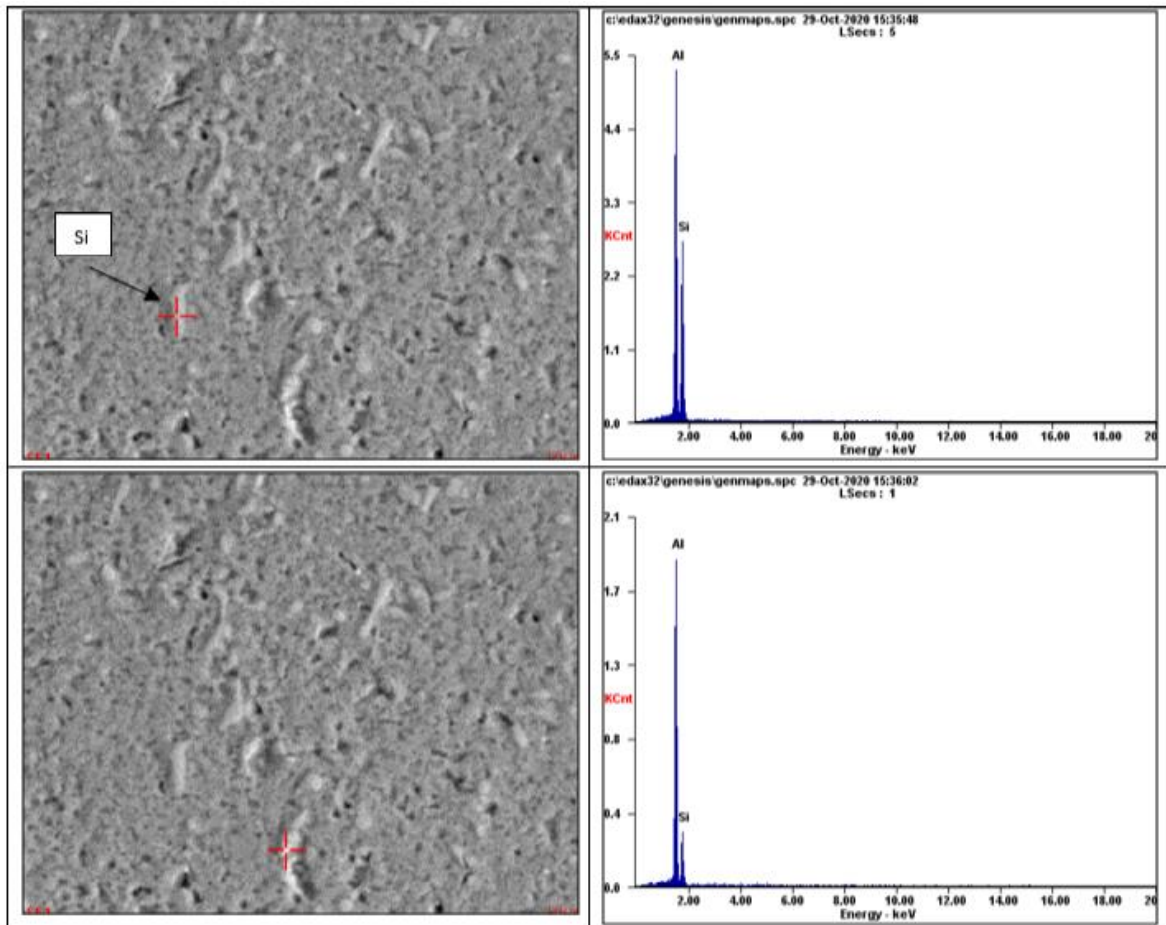


Figura 75. Análisis por EDX de fases en la aleación 0, condición sobre envejecida.

En tanto en la aleación 1, ( $Al-7Si-0.5Cu$  con  $0.15V$ ,  $0.15Ti$  y  $0.15Zr$ ), sobre envejecida, se muestra la presencia de fases  $AlSiFeCu$  y  $AlSiZr$ , en una matriz de  $Al$ . Figura 76.

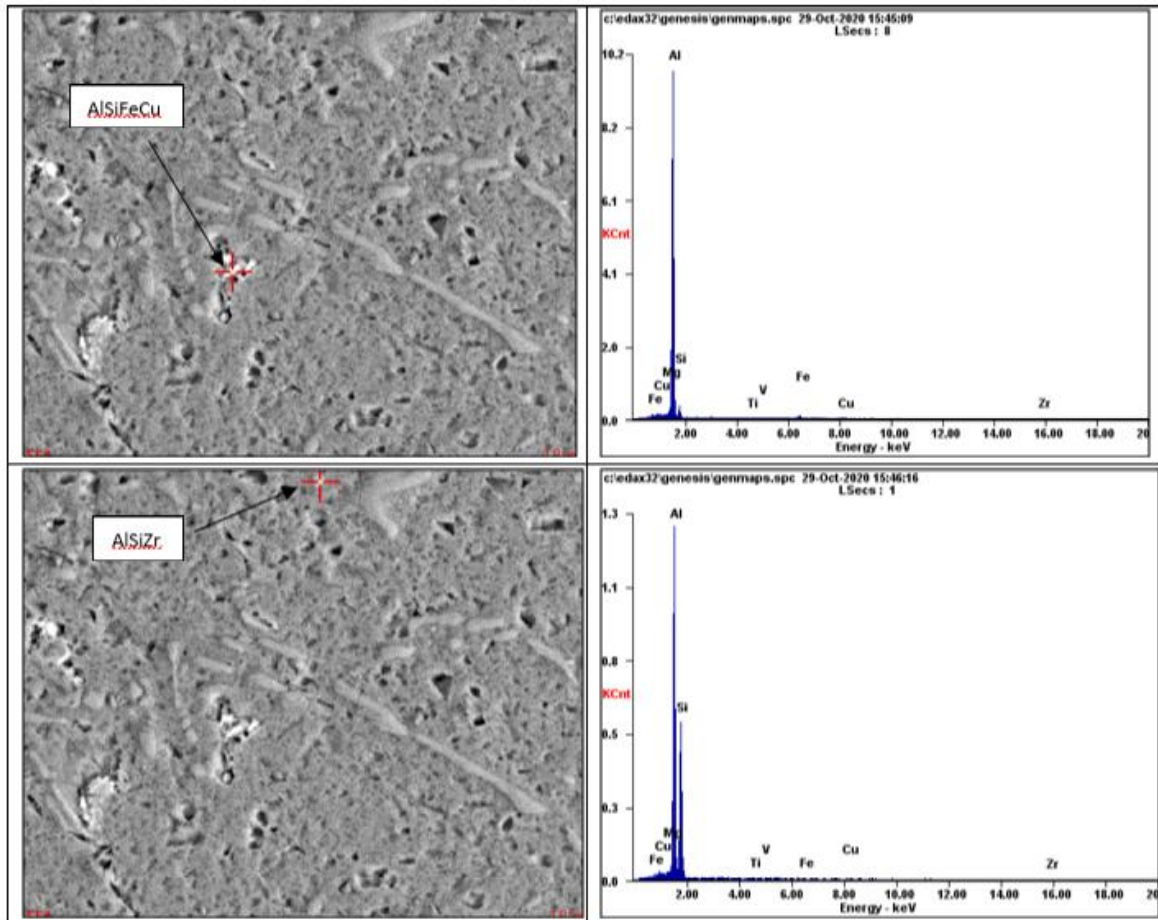


Figura 76. Análisis por EDX de fases en la aleación 1, condición sobre envejecida.

En la imagen siguiente podemos ver el mapeo realizado mediante la caracterización de fases mediante Espectroscopía de rayos x de energía dispersiva de la aleación 1 en condición de sobre envejecido (Figura 77).

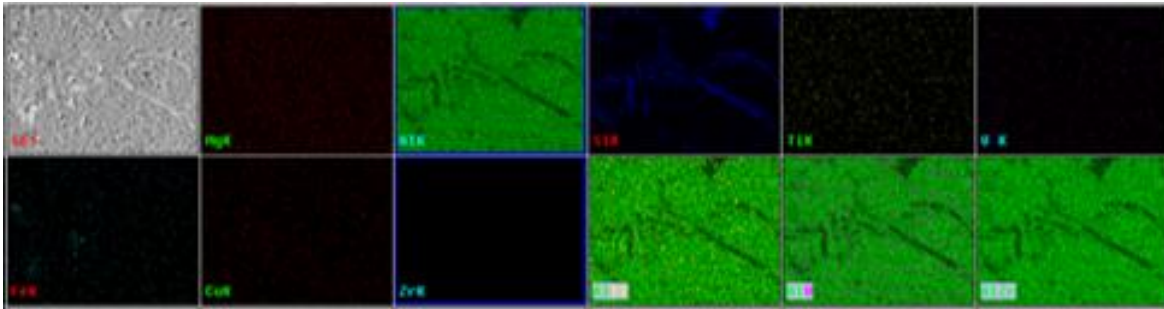


Figura 77. Mapeo químico en la aleación 1, sobre envejecida.

Conforme se incrementó el contenido de Ti y Zr, en la aleación 4, (*Al-7Si-0.5Cu con 0.15V, 0.30Ti y 0.30Zr*), respecto de la aleación 1, se observaron mayor cantidad de fases *AlSiVTiZr* y *AlSiZr*, mas gruesas y dispersas. Esto seguramente favorece el incremento en la resistencia de la aleación, en esta condición. Figura 78.

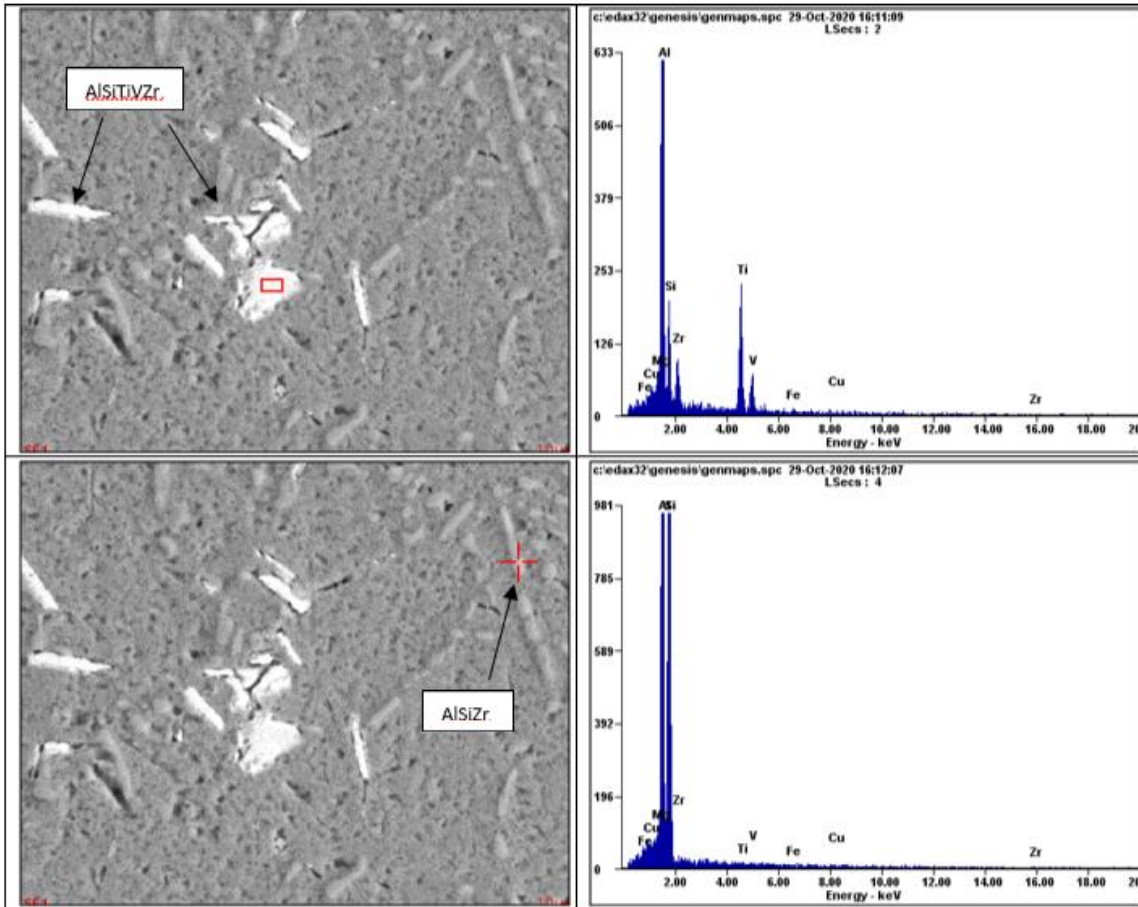


Figura 78. Análisis por EDX de fases en la aleación 4, condición sobre envejecida.

Por ultimo podemos ver el mapeo realizado mediante la caracterización de fases mediante Espectroscopía de rayos x de energía dispersiva de la aleación 4 en condición de sobre envejecido (Figura 79).

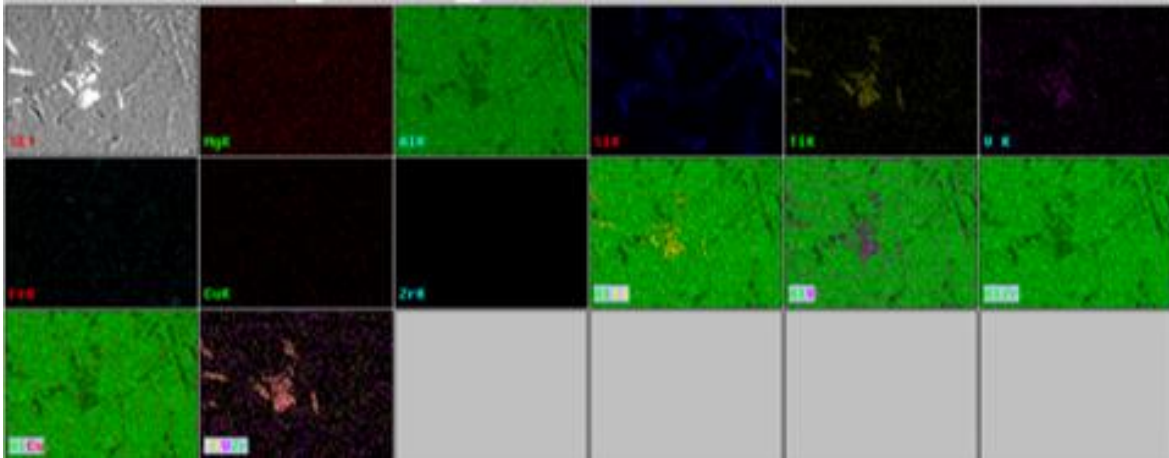


Figura 79. Mapeo químico en la aleación 4, sobre envejecida.



La Tabla 9 que se presenta, enseguida muestra un resumen de las fases presentes en las aleaciones, dependiendo de su condición.

Tabla 9. Fases presentes en las aleaciones según su condición.

Condición	Aleación			
	0	1	4	8
Colada	Matriz Al <i>AlSiCu</i> <i>AlSiFeCu</i> <i>AlSi</i>	Matriz con solución sólida de <i>AlSiTiVFeCuZr</i> <i>AlSiFeCuZr</i> <i>AlSiCuZr</i> <i>AlCu</i>	Matriz de Al con solución sólida de todos los elementos. <i>AlSiFeCuZr</i> <i>AlSiFeCu</i> <i>AlSiCu</i> <i>AlSiZr</i> <i>AlSiVCuZr</i> <i>AlSiTiVZr</i> <i>AlSiCuZr</i> Si eutéctico	_____
Tratada térmicamente	Matriz con AlSi y solución sólida de elementos. <i>AlSiFeCu</i>	<i>AlSi</i> <i>AlSiZr</i> <i>AlSiFeCuZr</i>	Matriz Al <i>AlSiTiVZr</i> <i>AlSiZr</i>	_____
Sobre envejecida	Matriz Al, con Si en solución. Resto de fases solo eutéctico Al-Si.	<i>AlSiFeCu</i> <i>Al-Si Zr</i>	<i>AlSiTiVZr</i> <i>AlSiZr</i>	<i>AlSiZr</i> <i>AlSiTiVZr</i>

En resumen: la condición colada, la matriz de las aleaciones analizadas, presentó elementos Si, V, Ti, Fe, Cu y Zr, en solución sólida.

En las aleaciones 1,4 y 8 se identificaron fases complejas como: *AlSiTiFeCuZr*, *AlSiFeCuZr* y *AlSiZr* y *AlSiTiVZr* en condición colada, tratada térmicamente y sobre envejecida.

#### 4.3.4. Caracterización metalográfica mediante microscopía electrónica de barrido (SEM)

Efecto del tratamiento térmico y sobre envejecido en las aleaciones.

Enseguida se muestran las imágenes obtenidas del estudio de caracterización metalográfica mediante microscopía electrónica de barrido, de las aleaciones 0, 1 y 4, en sus tres condiciones, as cast (coladas), tratadas térmicamente y sobre envejecidas con un aumento de 750X (Figuras 80, 81 y 82).

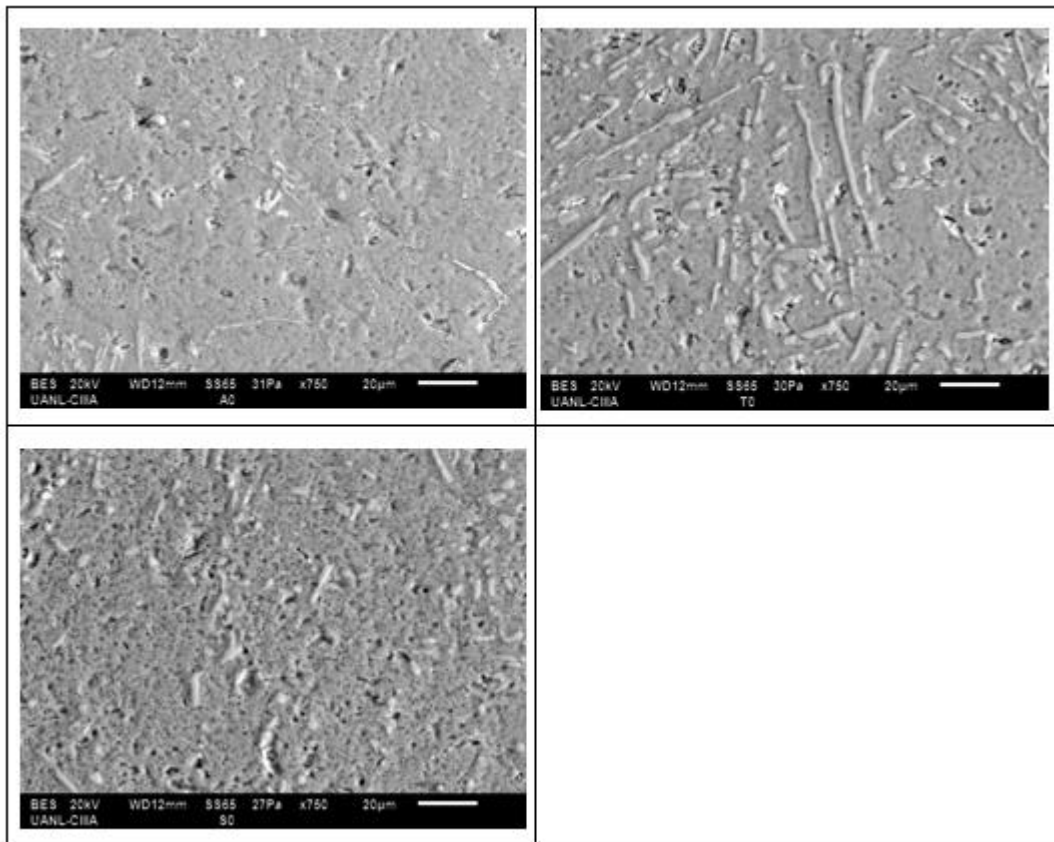


Figura 80. Micrografías de la aleación 0 (Al-7Si-0.5Cu) en diferentes condiciones, colada, tratada térmicamente y sobre envejecida. 750X

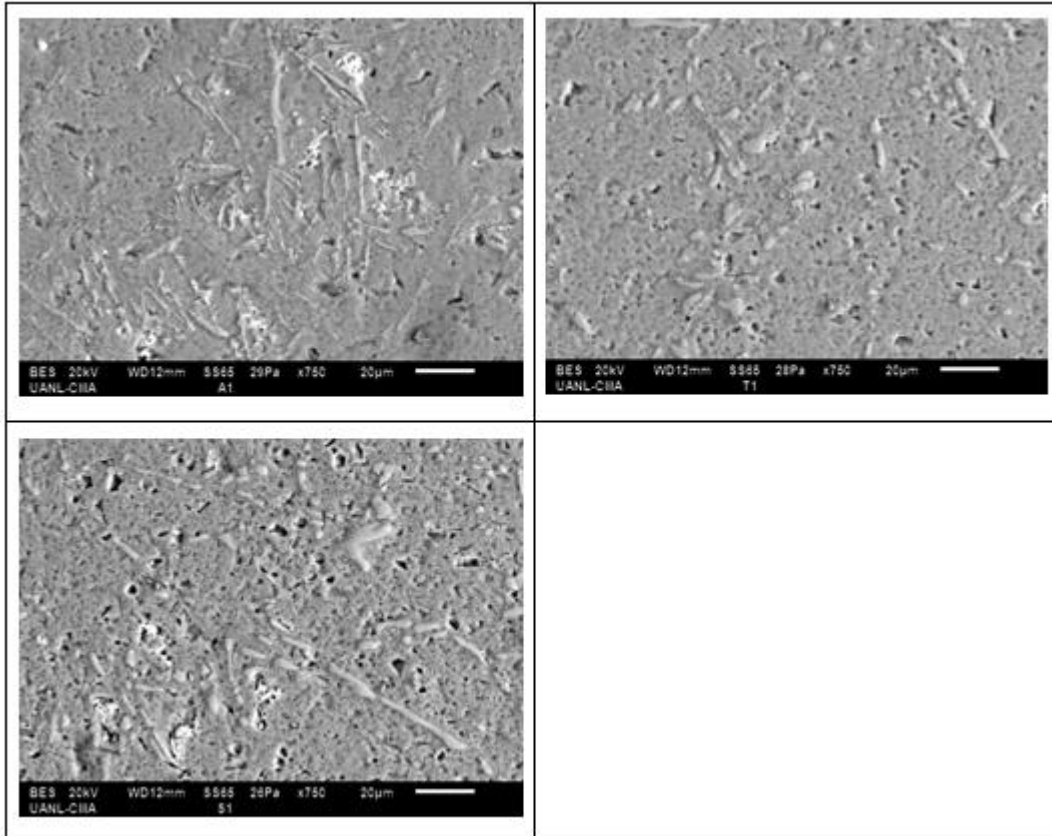


Figura 81. Micrografías de la Aleación 1 ( $Al-7Si-0.5Cu$  con  $0.15V$ ,  $0.15Ti$  y  $0.15Zr$ ), en diferentes condiciones, colada, tratada térmicamente y sobre envejecida. 750X

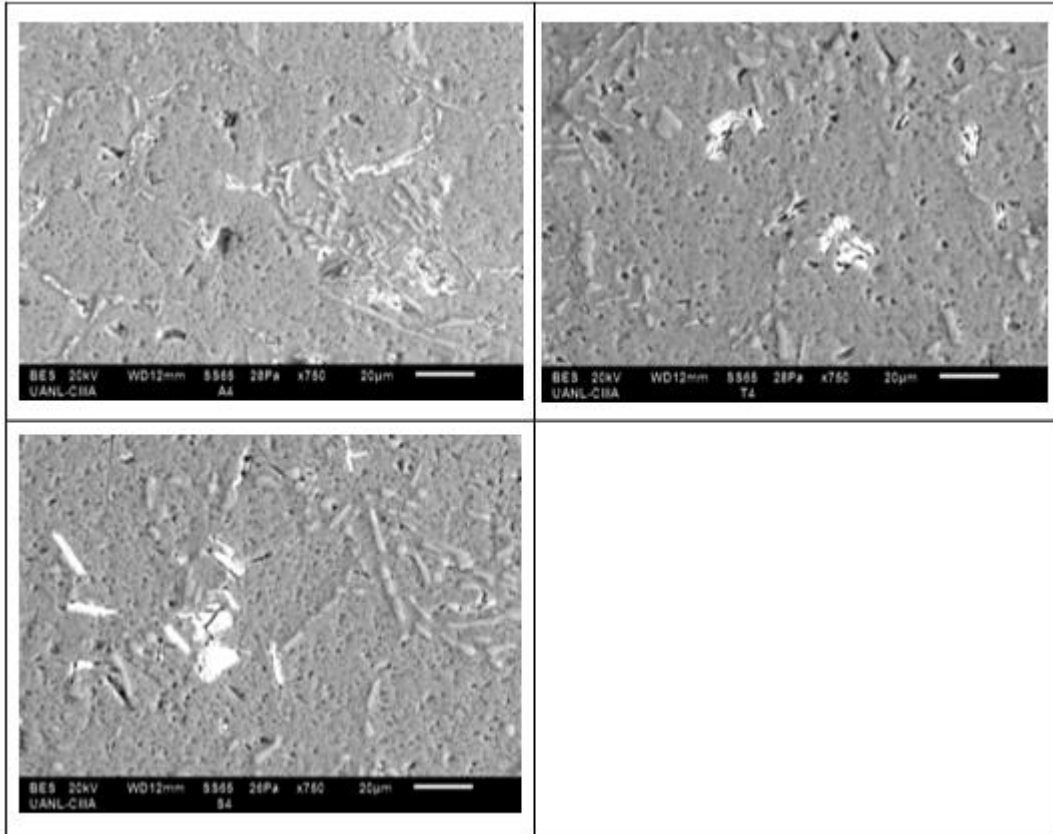


Figura 82. Micrografías de la aleación 4 ( $Al-7Si-0.5Cu$  con  $0.15V$ ,  $0.30Ti$  y  $0.30Zr$ ), en diferentes condiciones, colada, tratada térmicamente y sobre envejecida. 750X.

En general, el tratamiento térmico aplicado, en su parte de tratamiento por solución, disuelve en parte el silicio eutéctico y elementos de aleación en la matriz de aluminio, además esferoidiza las partículas de silicio no disueltas. Con el tratamiento térmico se produce también la precipitación submicroscópica de partículas coherentes durante el envejecido.

El sobre envejecido de las diversas aleaciones, favorece el crecimiento de partículas de silicio y otros tipos de fases presentes.

Efecto de la composición química.

Con el incremento en los contenidos de aleación, V, Ti y Zr en las aleaciones coladas, se formó una mayor cantidad y tamaño de partículas brillantes irregulares caracterizadas por EDX como AlSiTiVZr, localizadas entre el eutéctico Al-Si, Figura 83.

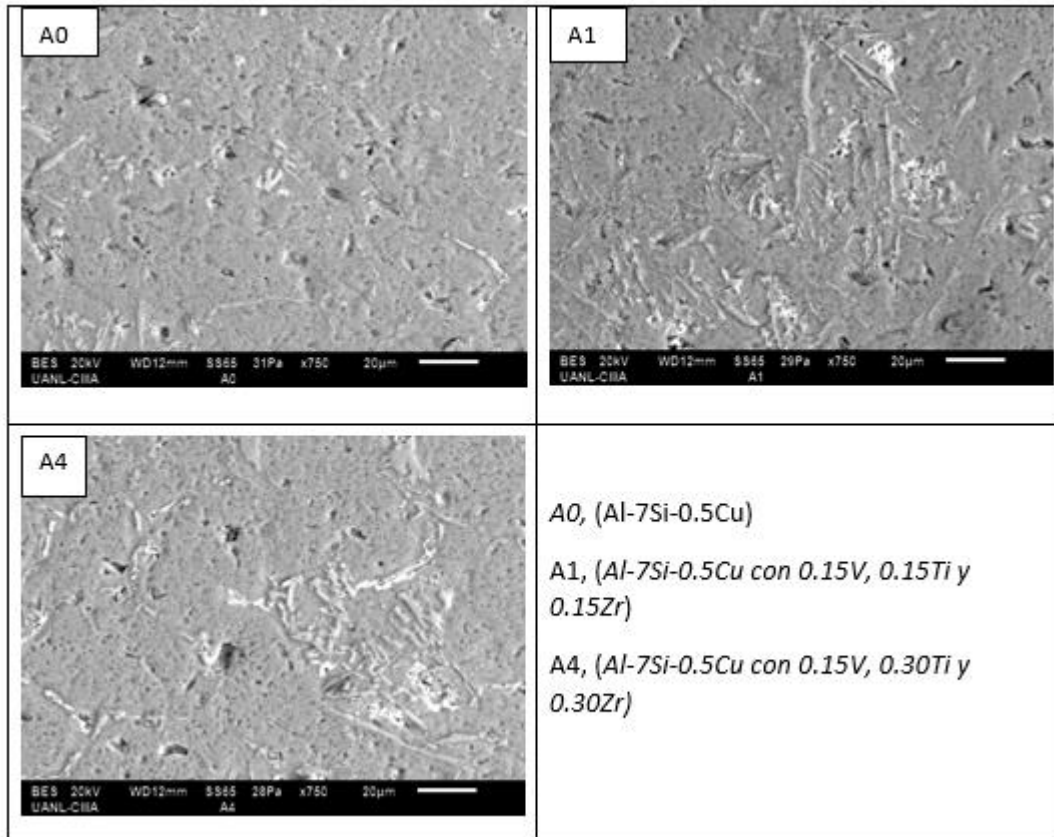


Figura 83. Micrografías de las diversas aleaciones en condición de colado.750X.

En el tratamiento térmico, las aleaciones 1 y 4, con ciertos contenidos de V, Ti y Zr, presentaron una menor cantidad de silicio eutéctico, así como de menor tamaño. Es la aleación 4, la que presentó la microestructura más fina. Así mismo, se observan las fases blancas brillantes,  $AlSiTiVZr$ , presentes en esta aleación. Figura 84.

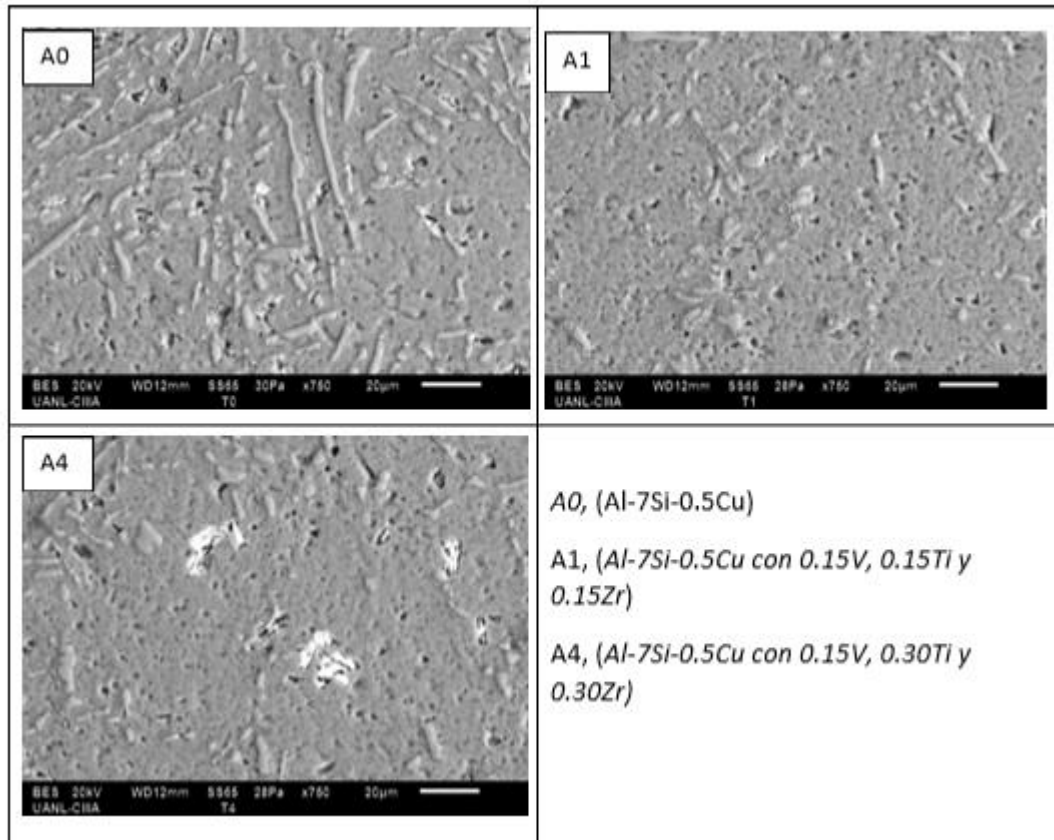


Figura 84. Micrografías de las diversas aleaciones en condición de tratamiento térmico. 750X

Con el incremento en los contenidos de aleación, V, Ti y Zr en las aleaciones coladas, se formó una mayor cantidad y tamaño de partículas brillantes irregulares, AlSiTiVZr, localizadas entre el eutéctico Al-Si, Figura 4, que durante el envejecido prevalecen y crecen. Figura 85.

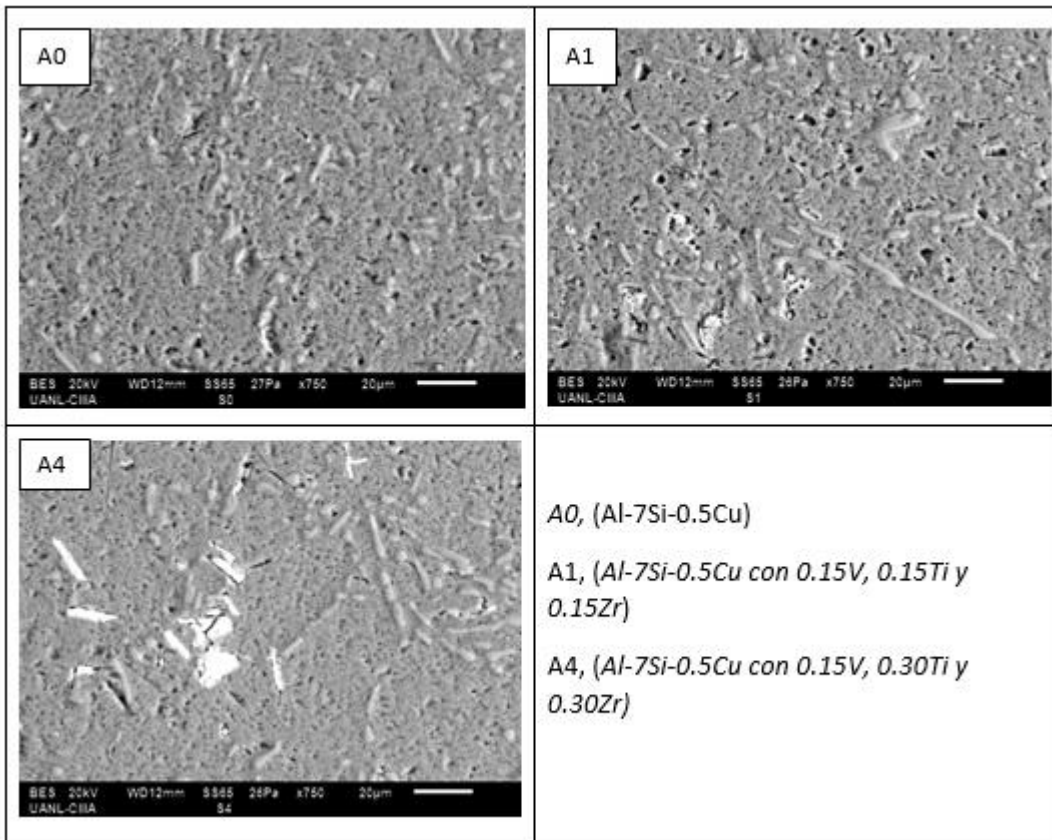


Figura 85. Micrografías de las diversas aleaciones en condición de sobre envejecido. 750X

#### 4.4 Dureza

Los resultados de dureza se muestran en la Tabla 10 y analizados de una forma más sencilla y practica en la Figura 86.

Tabla 10. Resultados de Dureza HRF.

Aleación	Condición		
	As Cast	T6	Sobre envejecido
0	33.2	14.5	22.6
1	36.6	28	22.2
2	38.2	31.6	16
3	40.3	20.2	23.3
4	42.4	30.9	27.2
5	42.1	30.5	23.2
6	40.4	35.2	27.3
7	40	27.6	12.5
8	44.8	21.1	20.8

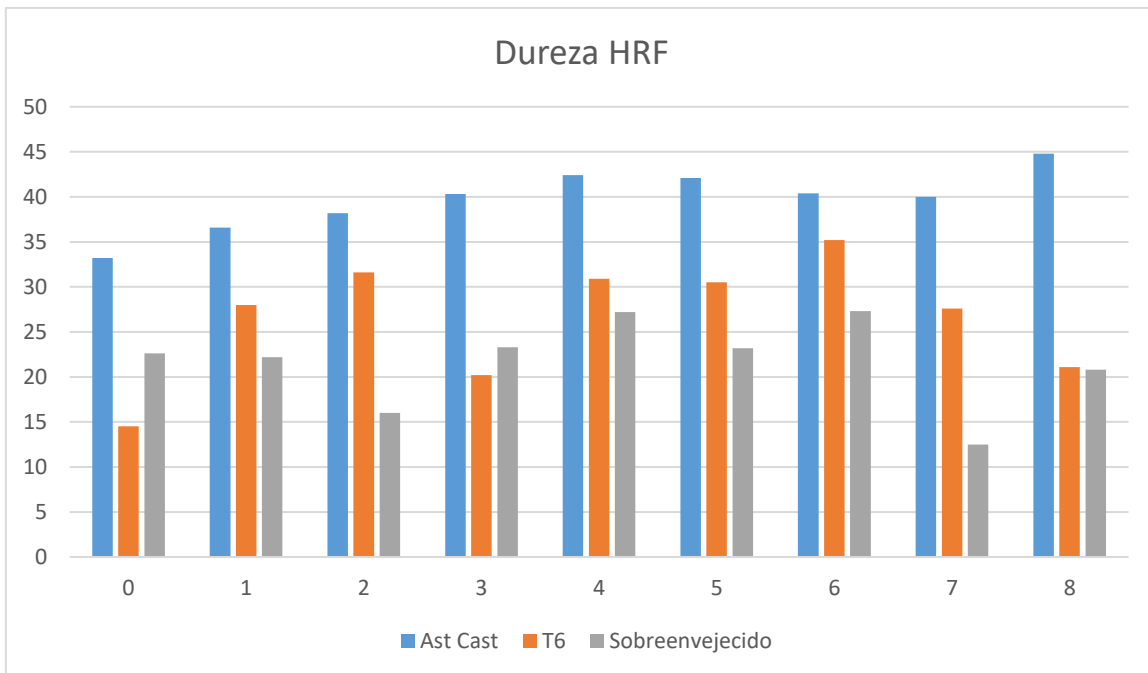


Figura 86. Resultados de dureza, de 9 aleaciones por tres condiciones.



#### 4.5 Pruebas de compresión a temperatura ambiente

Los resultados de las pruebas de compresión a temperatura ambiente en condición as cast, los podemos ver enseguida en la Tabla 11, así como un gráfico obtenido en el software de la maquina universal utilizada, donde podemos observar el comportamiento de la deformación según la carga aplicada, esto se observa en la Figura 87.

Tabla 11. Resultados de compresión a temperatura ambiente- As Cast

Muestra	Max. Carga (KN)	Max._Despl (mm)	Max._Esfuerzo a la compresión (N/mm2)	Max._Deformacion a la compresión %
0	89.9641	11.3260	1129.75	74.9689
1	89.9734	10.7965	1036.11	70.0157
2	89.9938	11.3495	1069.68	72.0832
3	89.9875	11.5315	1044.29	72.8043
4	89.9656	10.6995	1073.71	71.9509
5	89.9516	10.0705	1003.22	69.5431
6	89.9610	10.4850	998.651	67.1719
7	89.9626	10.9845	1005.18	70.3007
8	89.9563	10.7605	1174.54	73.1980

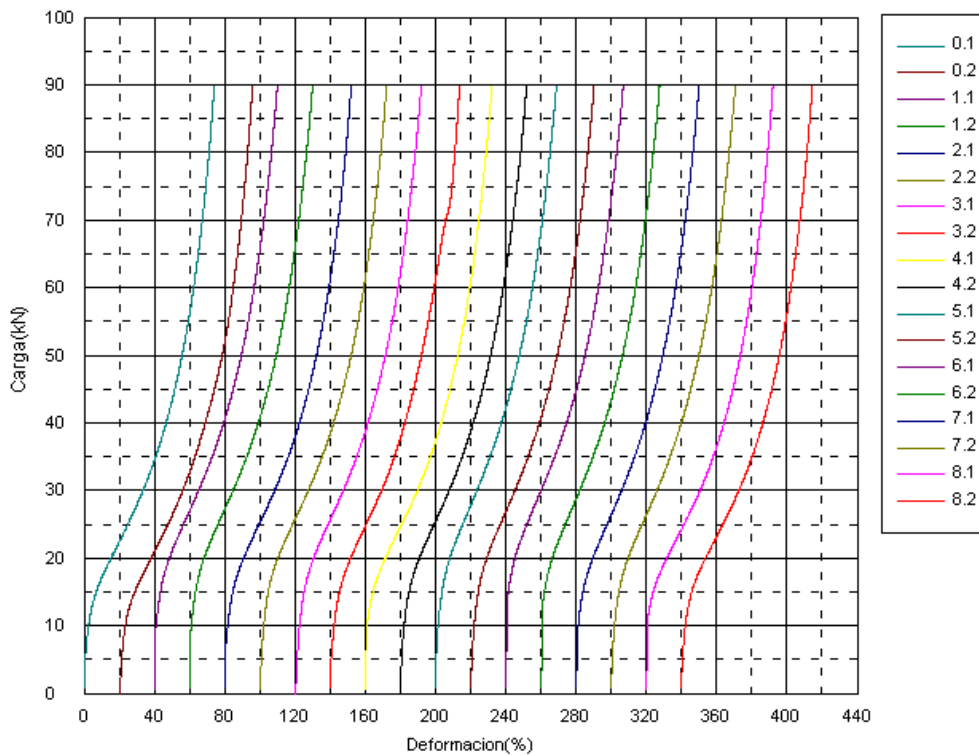


Figura 87. Gráfica deformación-carga de prueba a compresión a temperatura ambiente As-cast

De la misma forma que los datos anteriores, los resultados que se muestran a continuación, es el valor de la media de las 3 probetas ensayadas para cada aleación, este valor es el que se considerara para los análisis debidos, mostrando el caso de las tratadas térmicamente (Tabla 12, Figura 88) y el de sobre envejecido (Tabla13, Figura 89).

Tabla 12. Resultados de compresión a temperatura ambiente- T6

Muestra	Max._Carga (KN)	Max._Despl (mm)	Max._Esfuerzo a la compresión N/mm2	Max._Deformacion a la compresión %
0	93.9791	11.8647	1216.19	80.1778
1	89.9656	11.1983	1063.13	73.8781
2	89.9823	11.4937	1148.26	76.0734
3	89.9823	11.3860	1085.05	74.9234
4	89.9698	11.4423	1086.86	74.5596
5	89.9698	11.3857	1023.38	72.8130
6	89.9917	11.0343	1046.77	73.2763
7	89.9646	11.5197	1079.75	73.6706
8	89.9886	11.7443	1130.55	73.4827

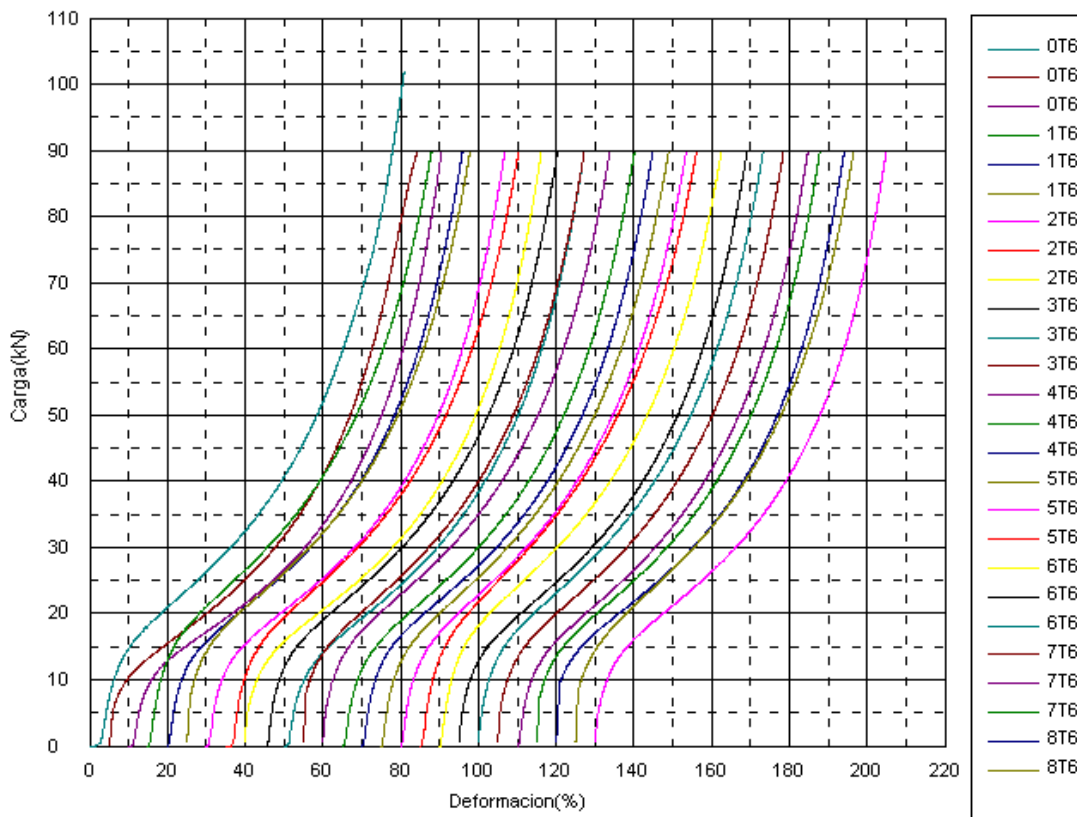


Figura 88. Gráfica deformación-carga de prueba a compresión a temperatura ambiente – T6

Tabla 13. Resultados de compresión a temperatura ambiente- sobre envejecido.

Muestra	Max. Carga (KN)	Max._Despl (mm)	Max. Esfuerzo a la compresió, N/mm2	Max. Deformación a la compresión,%
0	89.9344	11.3410	1094.17	74.9075
1	89.9688	11.6800	1017.59	74.3949
2	89.9938	12.0830	1084.27	77.0600
3	89.9406	11.7090	1087.86	75.0096
4	89.9313	11.7950	1122.48	76.7404
5	89.9844	11.1750	962.560	73.4231
6	90.0125	10.9640	1023.86	73.4853
7	89.9594	12.0660	1113.99	76.8535
8	90.0031	12.0510	1134.58	77.5982

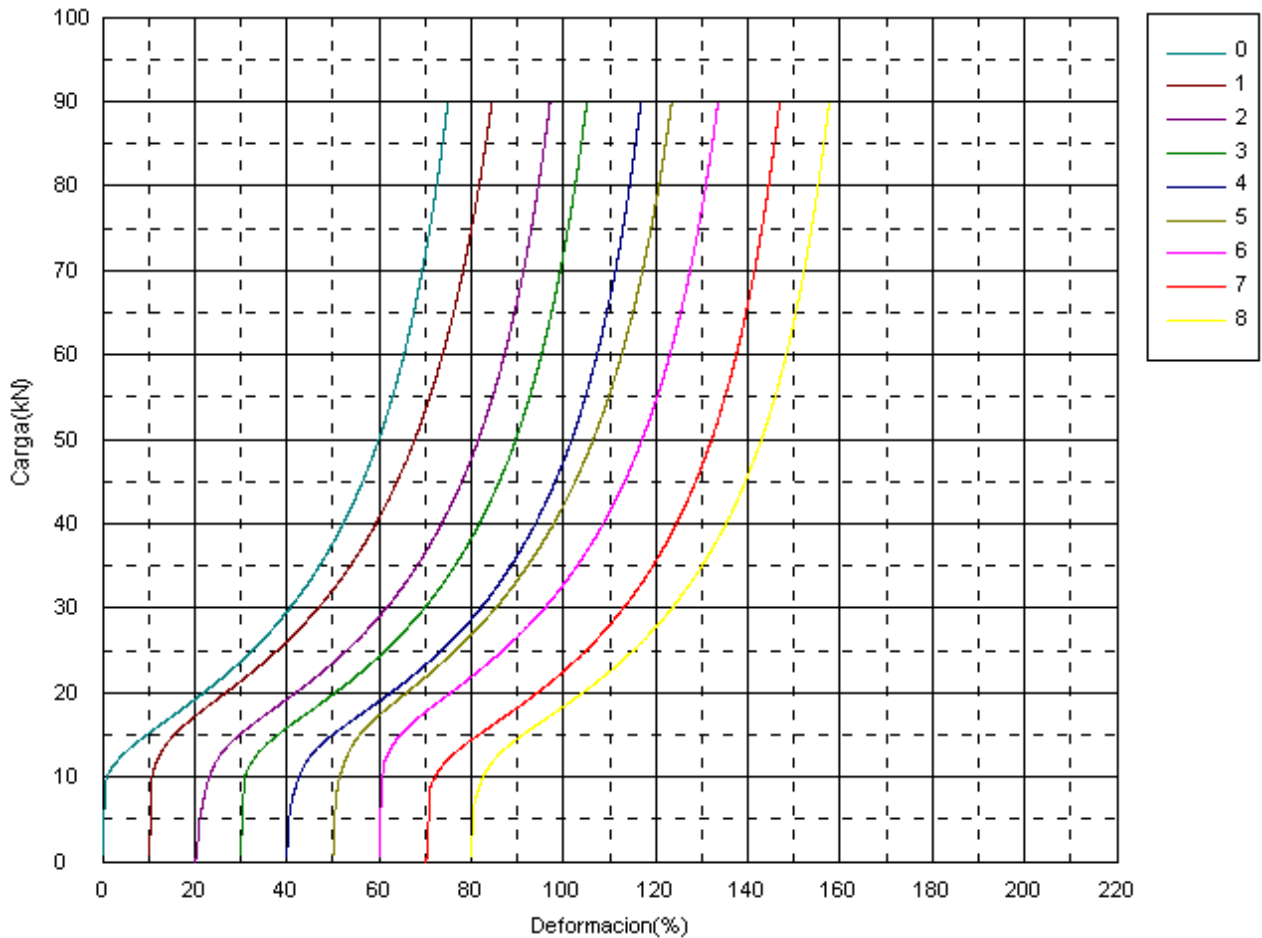


Figura 89. Gráfica deformación-carga de prueba a compresión a temperatura ambiente – T6

Comportamiento mecánico de aleaciones coladas a temperatura ambiente (Figura 90).



Figura 90. Comparación de probeta antes y después de ser sometida a compresión.

#### 4.5.1 Pruebas de compresión a temperatura ambiente – As cast

##### Esfuerzo máximo a la compresión:

En general, el añadir elementos aleantes Ti, V y Zr, a la aleación Al-7Si-0.5Cu disminuyeron la resistencia mecánica a la compresión. Excepto la condición con 0.3Ti-0.3V-0.3Zr. donde la resistencia a la compresión superó el valor de la aleación Al-7Si-0.5Cu (Figura 91).

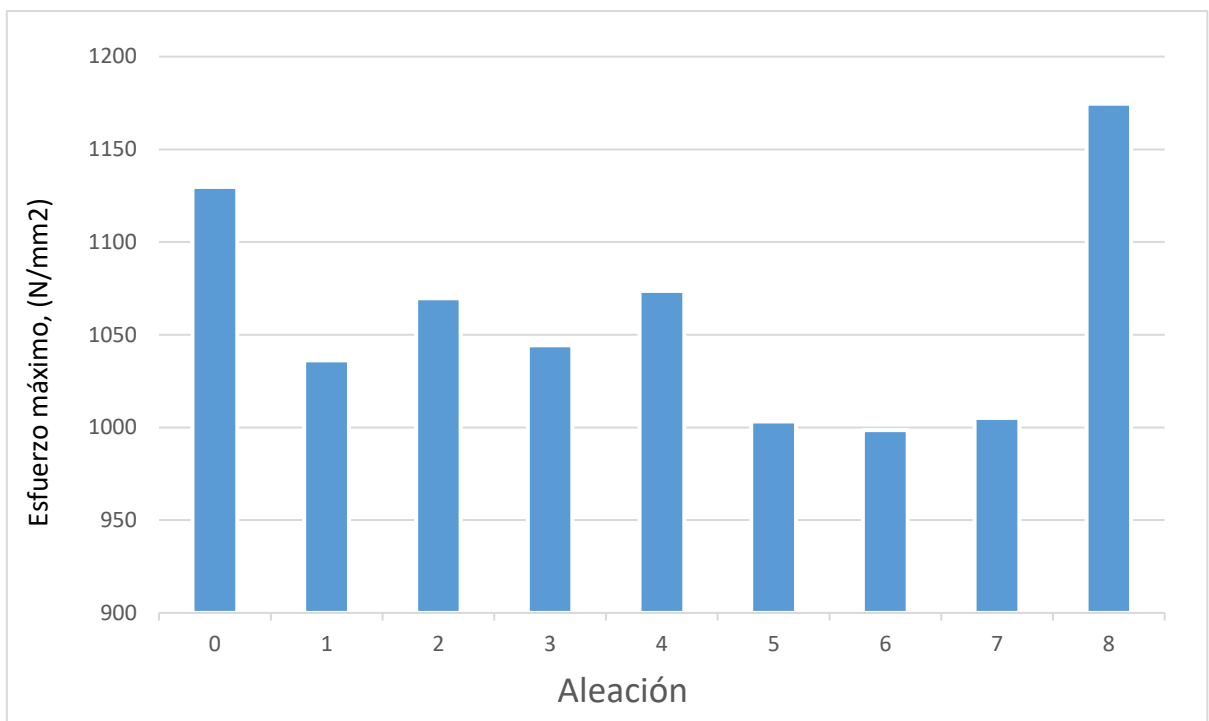


Figura 91. Esfuerzo máximo (N/mm<sup>2</sup>) de aleaciones As Cast bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.

### Deformación máxima a la compresión:

En términos generales, la adición de Ti, V y Zr redujo el porcentaje de deformación.

Sin embargo, al incrementar el contenido de esos elementos, 0.3Ti-0.3V-0.3Zr, tiende a igualar el valor de la aleación sin adición de elementos dispersoides (Figura 92).

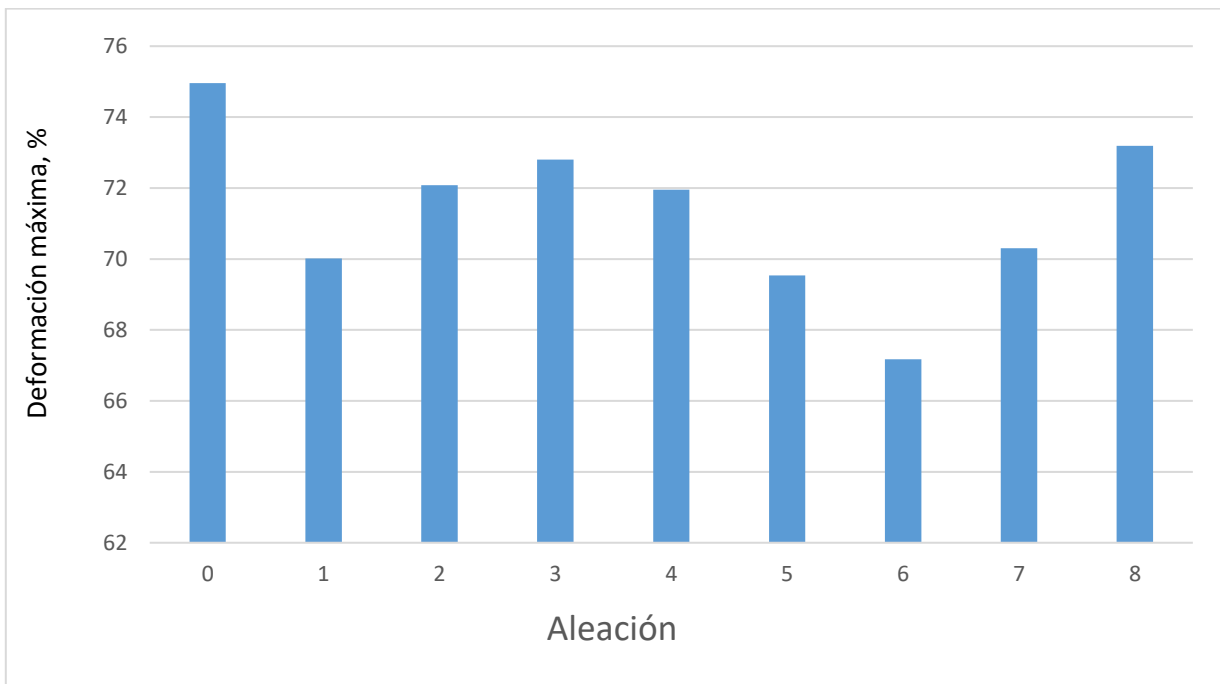


Figura 92. Deformación máxima (%) de aleaciones As Cast bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.

### Modulo elástico:

En general, la adición de elementos dispersoides elevaron el módulo elástico de la aleación Al-7Si-0.5Cu. El mayor valor lo obtuvo la aleación Al-7Si-Cu con 0.15V-0.15Ti-0.15Zr (Figura 93).

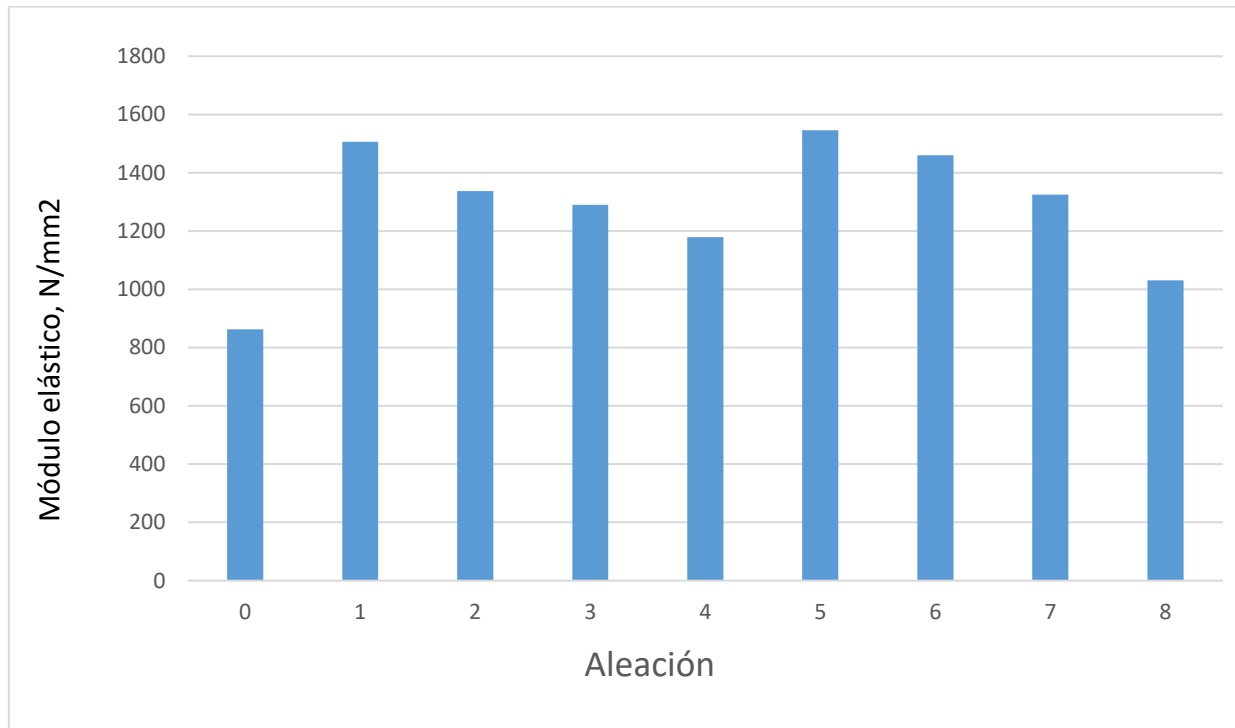


Figura 93. Módulo elástico (N/mm<sup>2</sup>) de aleaciones As Cast bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.

Los resultados de las pruebas de compresión a temperatura ambiente, en las aleaciones coladas muestran que en general la adición de elementos de aleación V, Ti y Zr, redujeron la resistencia a la compresión, así como la deformación. Con excepción de la aleación 8, con un contenido de 0.3 de V, Ti y Zr, presentó mayor resistencia y ductilidad que la aleación base Al-7Si-0.5Cu.

Por otra parte, el modulo elástico se incrementó con la adición de los elementos. La aleación 8, presentó el menor módulo de elasticidad. Mientras que la aleación 5, tiene un comportamiento diferente que el resto de las aleaciones.

#### 4.5.2 Pruebas de compresión a temperatura ambiente – T6

##### Esfuerzo máximo a la compresión:

En general: la aleación Al-7Si-0.5Cu en condición de tratada térmicamente, presentó mayor esfuerzo máximo; mientras que la adición de elementos Ti,V y Zr redujeron el esfuerzo máximo. La aleación 5, con adición de 0.15Ti-0.30V-0.15Zr, presentó la menor resistencia (Figura 94).

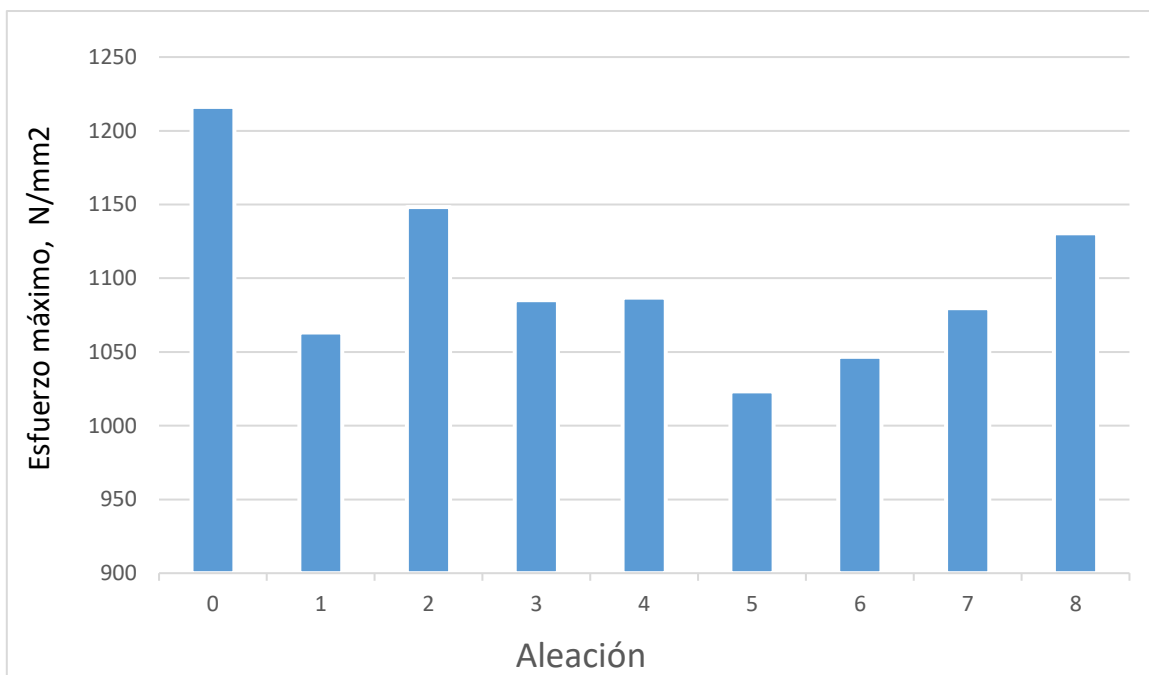


Figura 94. Esfuerzo Máximo (N/mm<sup>2</sup>) de aleaciones tratadas térmicamente bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.



### Deformación máxima a la compresión:

En general, en la aleación Al-7Si-0.5Cu en condición de tratada térmicamente, la adición de elementos Ti, V y Zr redujeron la deformación máxima (Figura 95).

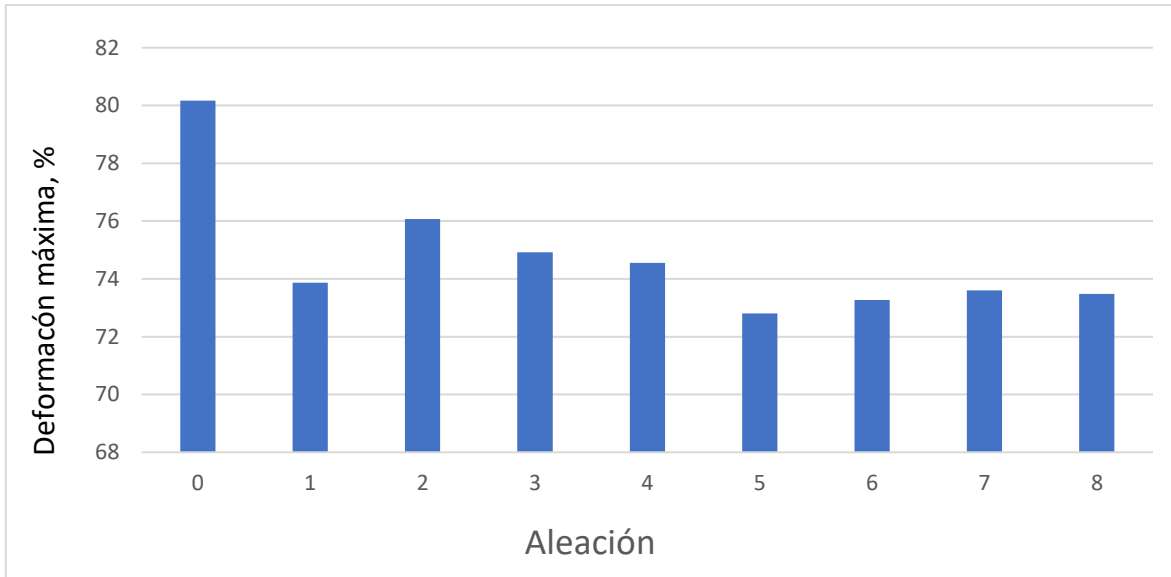


Figura 95. Deformación máxima (%) de aleaciones tratadas térmicamente bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.

### Modulo elástico:

En general: la adición de elementos Ti, V y Zr incrementaron el módulo de elasticidad, en promedio un valor de 40% (Figura 96).

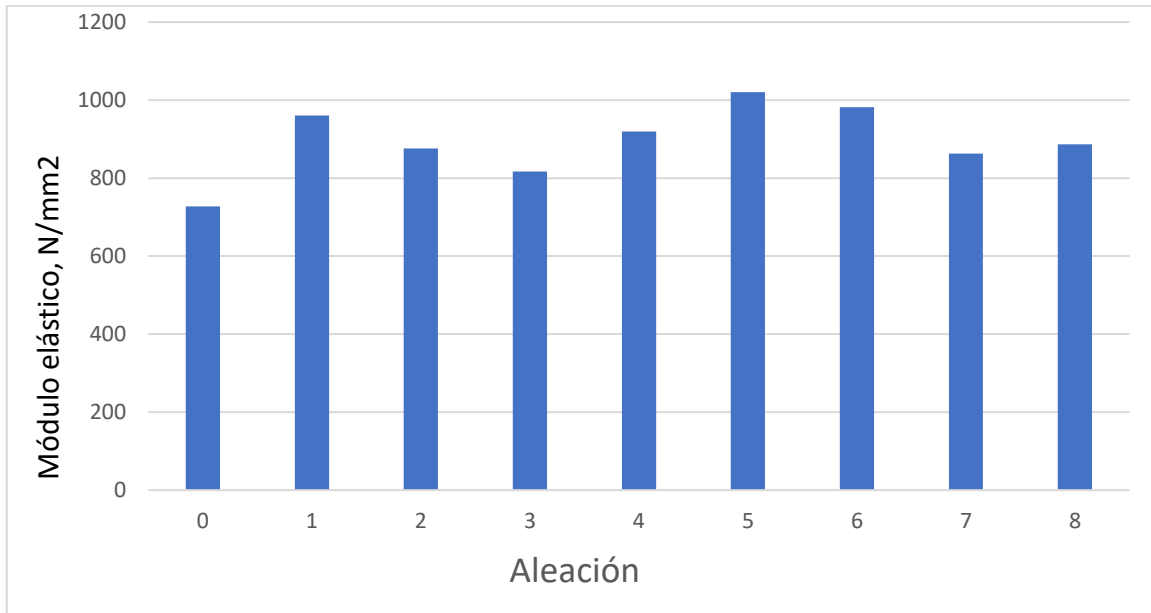


Figura 96. Módulo elástico (N/mm<sup>2</sup>) de aleaciones tratadas térmicamente bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.

En resumen, los resultados muestran que en la condición tratada térmicamente la adición de elementos aleantes a la aleación Al-7Si-0.5Cu ocasionó una menor resistencia, menor ductilidad y mayor modulo elástico que la aleación base, sin elementos de aleación. El comportamiento fue semejante a los resultados de la condición de colado.

#### 4.5.3 Pruebas de compresión a temperatura ambiente – Sobre envejecido

Efecto de la modificación de la composición química, en la aleación Al-7Si condición de sobre envejecido.

##### Esfuerzo máximo a la compresión:

La respuesta de la aleación en condición de sobre envejecido mostró que la adición de elementos Ti, V y Zr, ocasionó una diversidad en los valores de esfuerzo máximo, algunos menores que para la condición sin elementos Ti, V y Zr, mientras que otros fueron superiores a la misma (Figura 97).

La aleación 8, con adición de 0.3Ti-0.3V-0.3Zr, mostró mayor resistencia que la aleación base sin elementos de aleación (Figura 98).

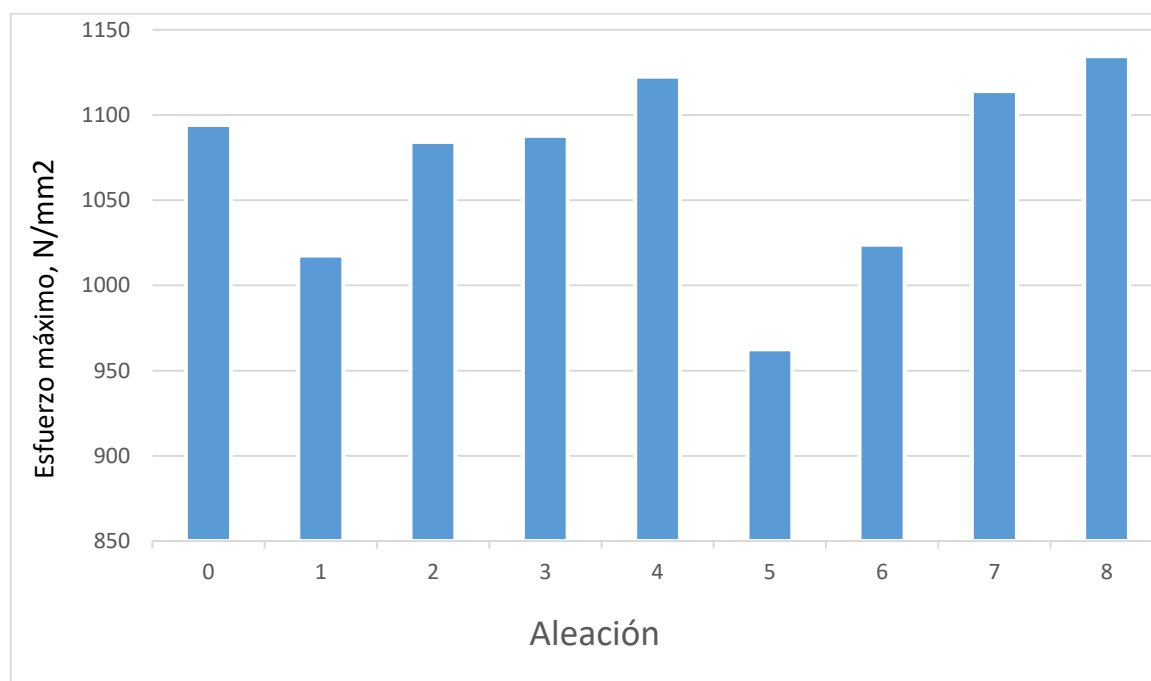


Figura 97. Esfuerzo máximo (N/mm<sup>2</sup>) de aleaciones sobre envejecidas bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.

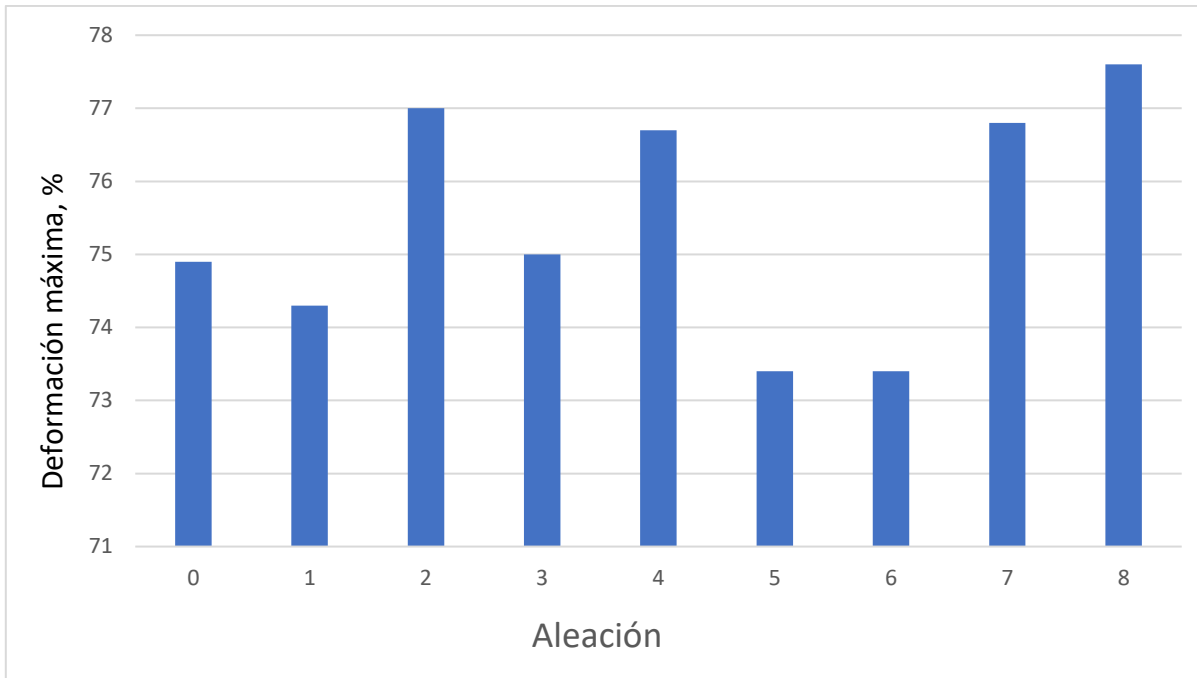


Figura 98. Deformación máxima (%) de aleaciones sobre envejecidas bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.

## Modulo elástico

Los resultados gráficos de compresión a temperatura ambiente del módulo elástico que presentaron las aleaciones en condición de sobre envejecido se dan en la (Figura 99).

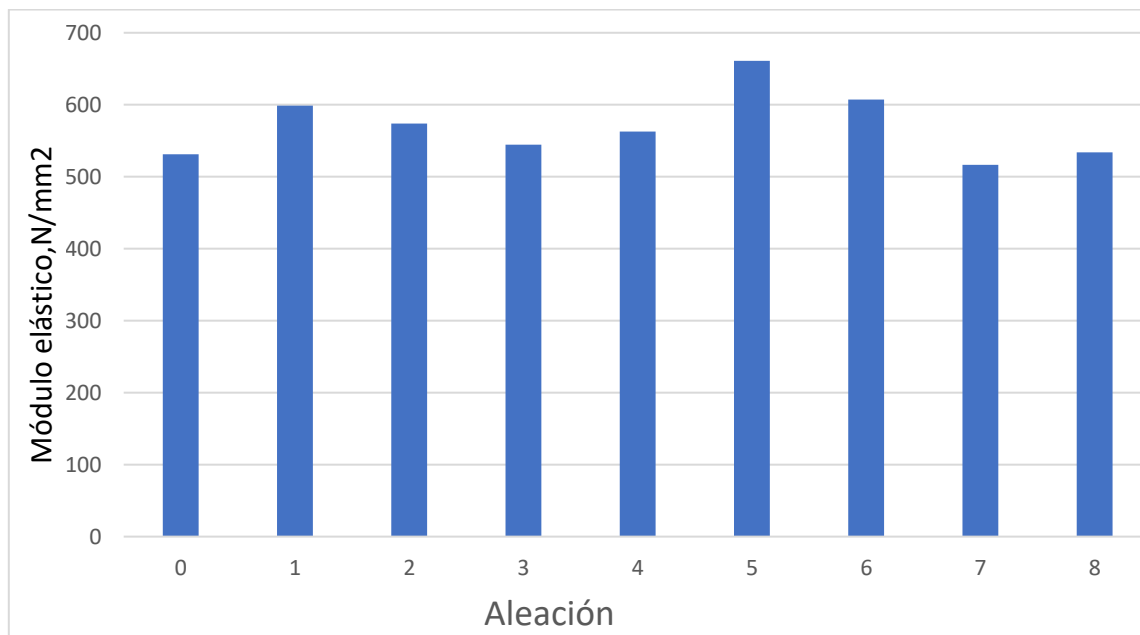


Figura 99. Módulo elástico (N/mm<sup>2</sup>) de aleaciones sobre envejecidas bajo el ensayo de compresión a temperatura ambiente.

Se puede observar que, al someter las aleaciones coladas y tratadas térmicamente, al sobre envejecimiento a 250°C por 100 h, los resultados fueron diversos, algunas aleaciones presentaron un aumento en el esfuerzo máximo, respecto de la aleación base, tal es el caso de las aleaciones 4 (Al-7Si-0.5Cu-0.15V-0.30Ti-0.30Zr) 7 (Al-7Si-0.5Cu-0.30V-0.30Ti-0.15Zr) y 8 (Al-7Si-0.5Cu-0.30V-0.30Ti-0.30Zr). En cuanto a la deformación, las aleaciones 4, 7 y 8 también presentaron mayor valor que la aleación base, mientras que el módulo de elasticidad fue en su mayoría superior a la aleación base. Esto significa que el añadir elementos aleantes Ti, V y Zr es benéfico para el mejoramiento del comportamiento mecánico de la aleación base Al-7Si-0.5Cu en la condición de sobre envejecido.

#### 4.5.4 Comparación de resultados de compresión a temperatura ambiente

Comparación del efecto del tratamiento térmico y del sobre envejecido sobre la aleación colada (As cast).

A continuación, se mostrarán las gráficas comparativas de cómo reacciona cada aleación as cast antes y después del tratamiento térmico T6 así como del sobre envejecido (Figuras 100-105), enseguida se muestra el comparativo ahora considerando las tres condiciones simultáneamente, bajo los tres parámetros: esfuerzo máximo, deformación máxima y modulo elástico. (Figuras 106, 107 y 108).

##### Efecto del T6

Con este análisis se puede observar que la aplicación del tratamiento térmico T6, en las aleaciones Al-7Si-0.5Cu sin aleantes y en la aleación Al-7Si-0.5Cu-0.15V-0.15Ti-0.15Zr, incrementaron su resistencia. Mientras que en la aleación Al-7Si-0.5Cu-0.3V-0.3Ti-0.3Zr, la resistencia disminuyó.

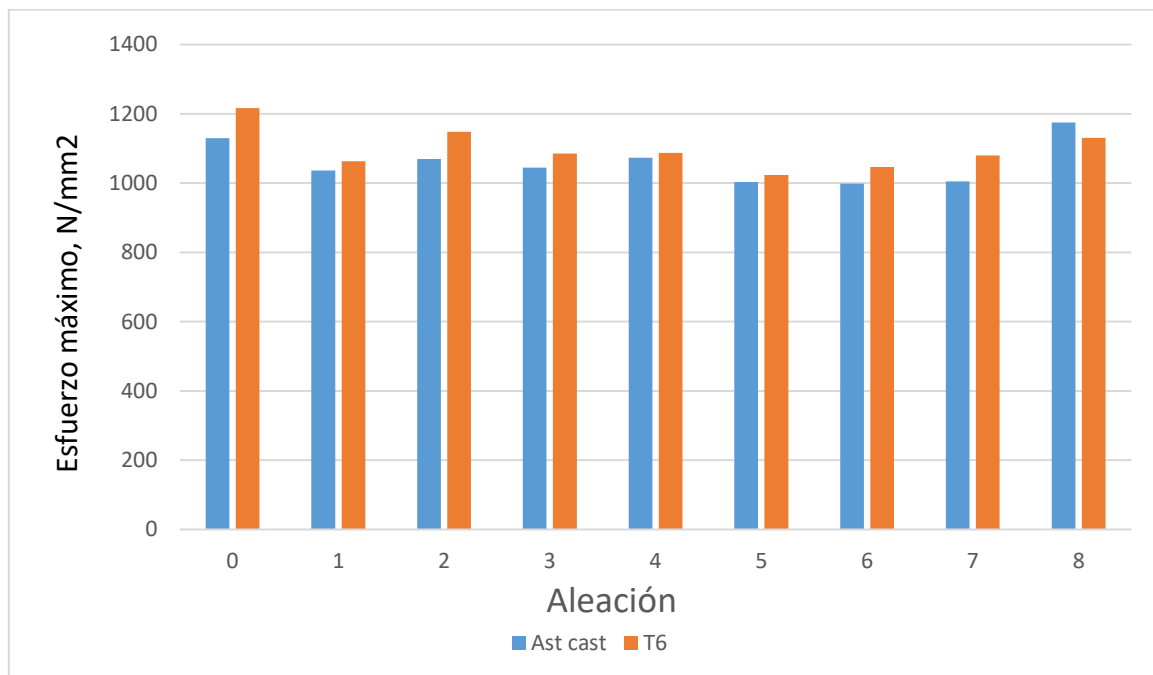


Figura 100. Esfuerzo máximo, comparación del efecto del tratamiento térmico sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.

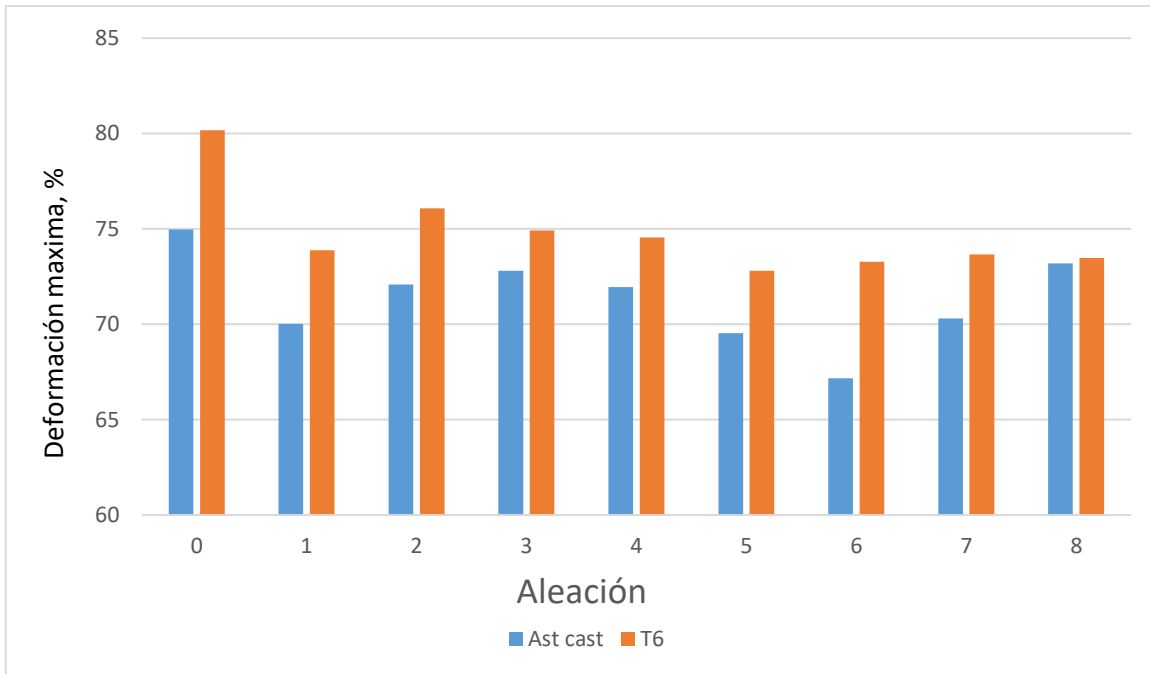


Figura 101. Deformación máxima, comparación del efecto del tratamiento térmico sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.

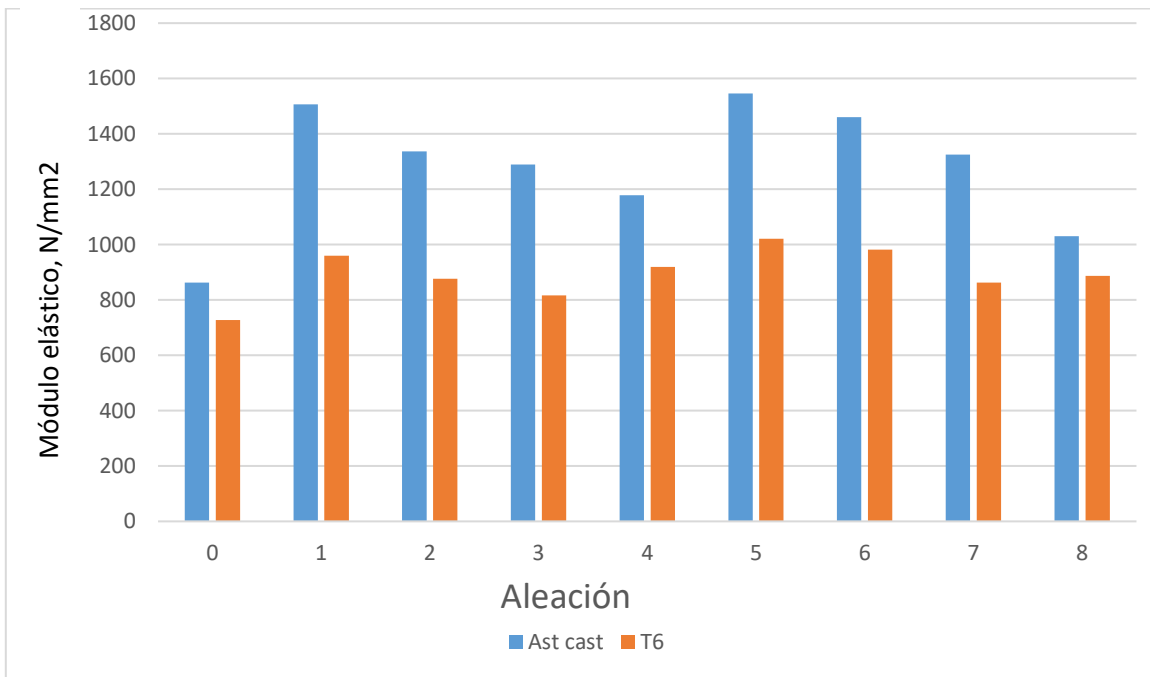


Figura 102. Módulo elástico, comparación del efecto del tratamiento térmico sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.

En general el tratamiento térmico hace que aumente el esfuerzo máximo y la deformación en las aleaciones coladas, es decir, el tratamiento térmico fue favorable para el incremento de la resistencia y la ductilidad. En cuanto al módulo de elasticidad el TT produjo una reducción notable, respecto de la aleación base.

Efecto del sobre envejecido.

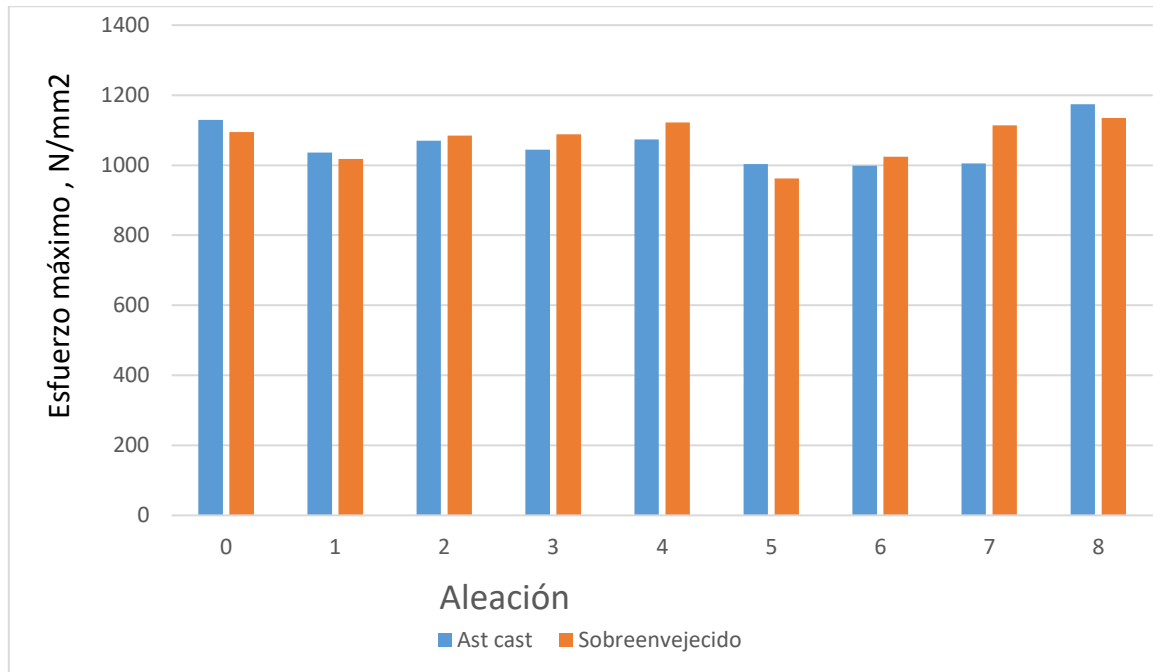


Figura 103. Esfuerzo máximo, comparación del efecto del sobre envejecido sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.

De acuerdo con la literatura, el sobre envejecido produce una disminución de las propiedades mecánicas. Sin embargo, al añadir los elementos de aleación V, Ti y Zr, algunas aleaciones envejecidas presentaron mayor resistencia que la aleación colada- aleaciones 2,4,6 y 7.

De igual manera se observa que algunas aleaciones con adiciones de elementos V, Ti y Zr, envejecidas, presentaron mayor resistencia que la aleación base envejecida, aleaciones 4,7 y 8. Resaltando que la aleación 8 (Al-7Si-0.5Cu-0.30V-0.30Ti-0.30Zr) presentó la mayor resistencia mecánica.



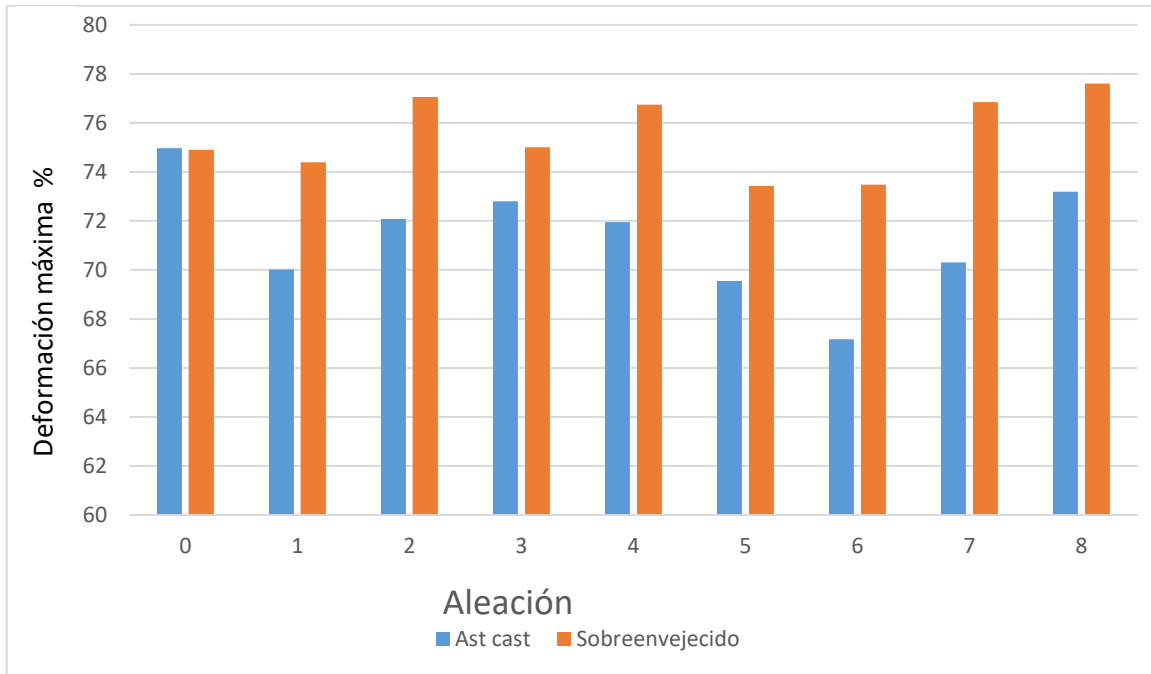


Figura 104. Deformación máxima, comparación del efecto del sobre envejecido sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.

Con el sobre envejecido, se aumentó la deformación máxima en todas las aleaciones. De acuerdo con la literatura el sobre envejecido aumenta la deformación. Por otra parte, se puede mencionar que las aleaciones 2, 4, 7 y 8 presentaron mayor deformación que la aleación base.

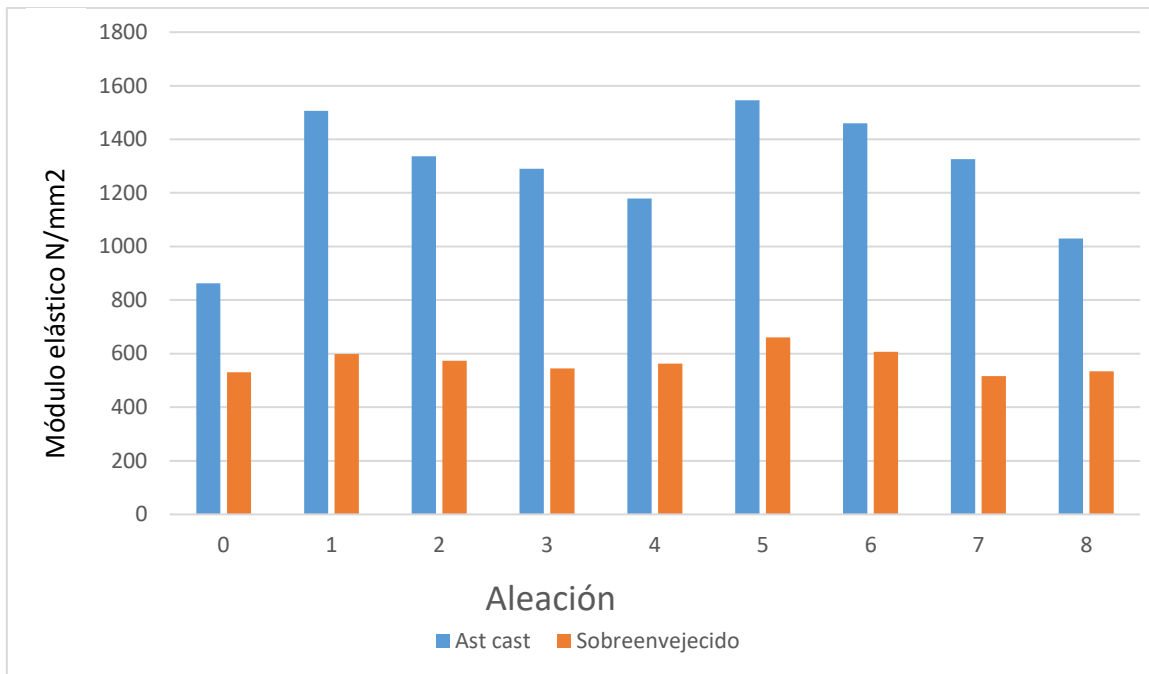


Figura 105. Módulo elástico, comparación del efecto del sobre envejecido sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.

Con el sobre envejecido el modulo elástico se redujo en gran medida, respecto a la aleación colada. Y respecto de la aleación base, en general, el modulo elástico es ligeramente mayor.

En general, aleaciones con V, Ti y Zr el sobre envejecido incrementa esfuerzo máximo y la deformación, así como una reducción en el módulo elástico, en comparación de su condición colada.

Las aleaciones con elemento añadidos V, Ti y Zr presentaron mayor resistencia y deformación que la aleación base en la condición de sobre envejecido. Así mismo, presentaron menor modulo elástico. Ratificando el efecto favorable de la adición de estos elementos, en particular en la condición de sobre envejecido.

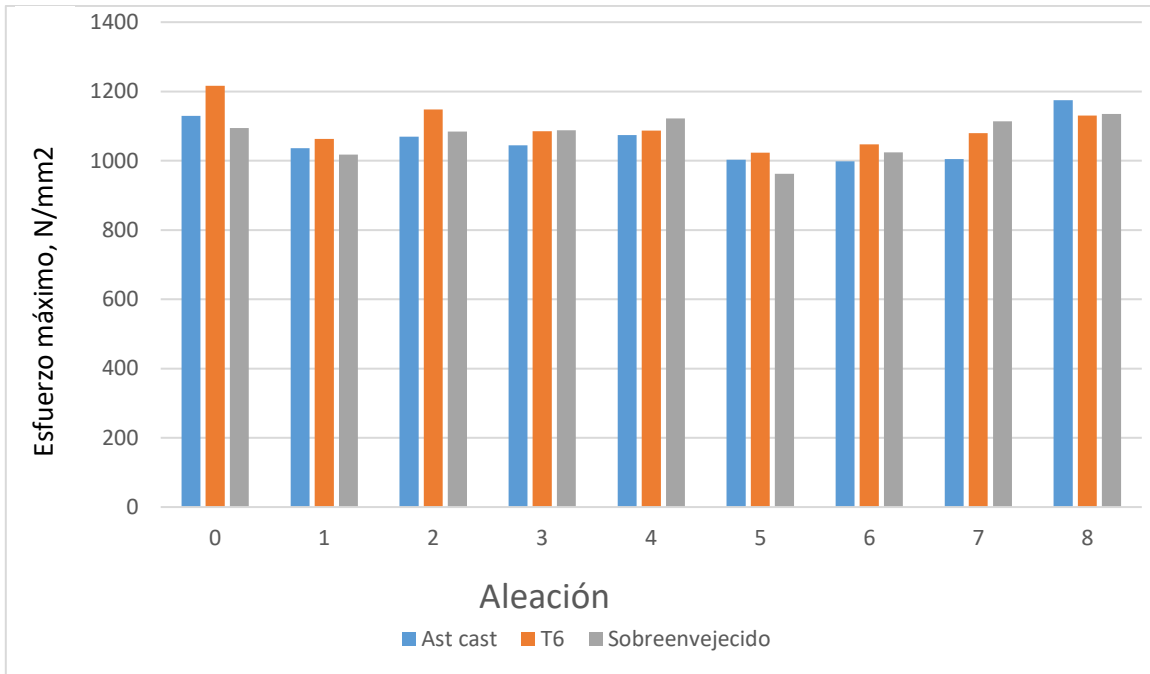


Figura 106. Esfuerzo máximo, comparación del efecto del tratamiento térmico y sobre envejecido sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.

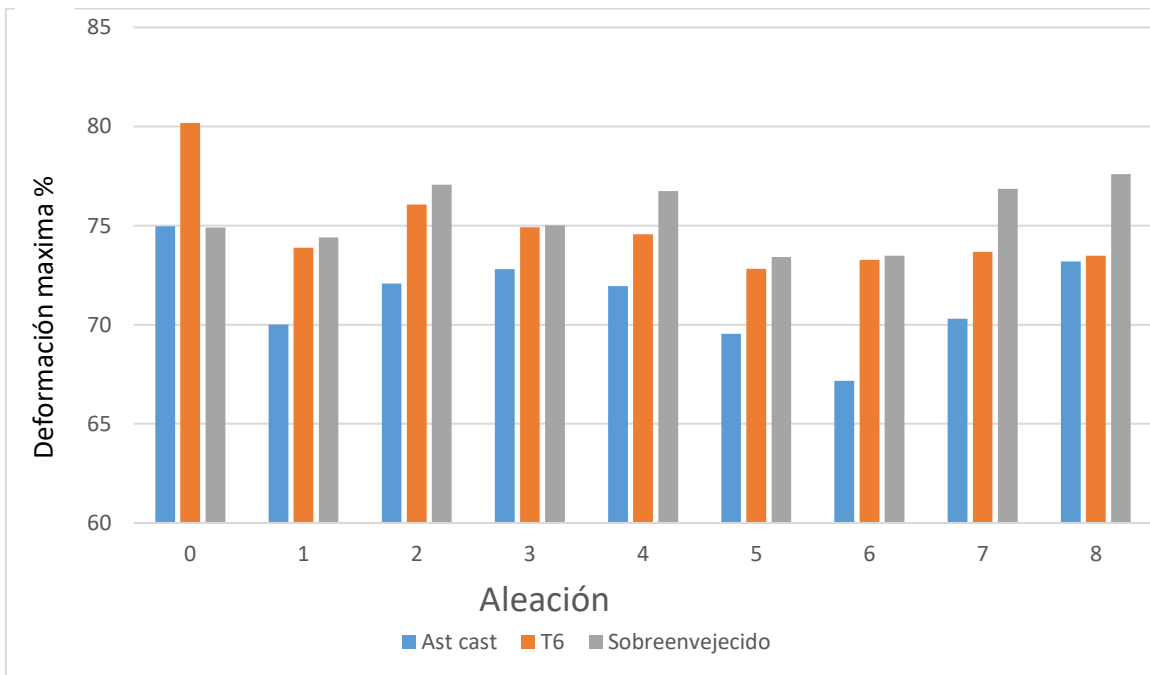


Figura 107. Deformación máxima, comparación del efecto del tratamiento térmico y sobre envejecido sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.

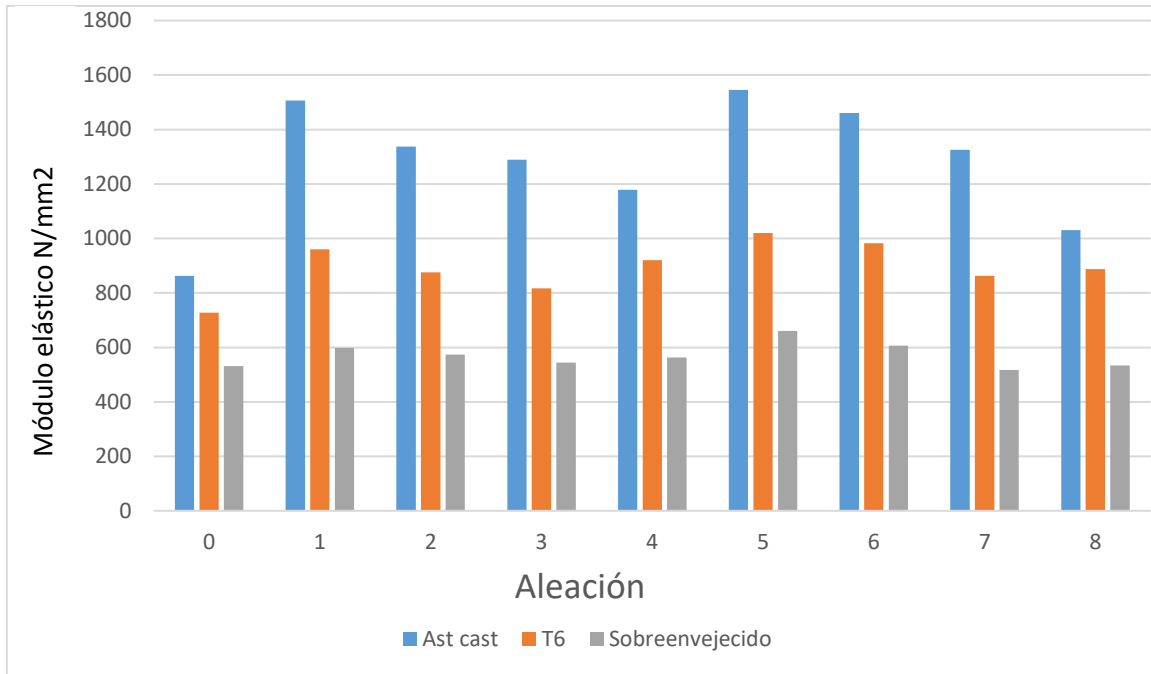


Figura 108. Módulo elástico, comparación del efecto del tratamiento térmico y sobre envejecido sobre la aleación colada (As cast), en pruebas de compresión a temperatura ambiente.

Las figuras anteriores, resumen los comportamientos ya analizados, el efecto de la adición de elementos aleantes, el efecto de TT, y del sobre envejecido.

Es preciso destacar el comportamiento equilibrado de la aleación 8 en el esfuerzo máximo, en las diversas condiciones colada tratada térmicamente y sobre envejecido. Al parecer el añadir 0.3V-0.3Ti-0.3Zr. la hace una aleación más recomendable. Esto en ensayos de compresión a temperatura ambiente.

## 4.6 Pruebas de compresión a alta temperatura

En la Tabla 14 se dan los resultados generales de los ensayos de compresión a alta temperatura.

Tabla 14. Resultados de compresión a alta temperatura

<i>Muestra</i>	<i>Carga máxima [kN]</i>	<i>Resistencia a la compresión [MPa]</i>	<i>Deformación a la compresión [mm/mm]</i>	<i>Esfuerzo de compresión en la rotura (estandar) [MPa]</i>	<i>Extensión de Compresión a carga máxima [mm]</i>	<i>Esfuerzo de compresión en cedencia (0.2 %) [MPa]</i>	<i>Deformación de compresión en cedencia. (0.2 %) [mm/mm]</i>
0	31.495	360.29	0.795	360.288	11.687	92.693	0.173
1	34.298	380.00	0.772	380.004	11.895	84.242	0.096
2	29.348	354.98	0.765	354.976	11.700	61.595	0.017
3	32.053	408.11	0.785	408.112	11.785	68.01	0.030
4	35.527	422.27	0.782	422.273	11.690	84.683	0.064
5	37.833	401.75	0.770	401.750	11.905	-----	-----
6	33.140	369.24	0.786	369.237	11.075	48.959	0.011
7	32.511	379.78	0.776	379.781	11.418	49.070	0.009
8	35.884	412.05	0.769	412.051	11.956	94.958	0.115

#### 4.6.1 Pruebas de compresión a alta temperatura – Sobre envejecido

En las aleaciones sobre envejecidas por 100 h a 250°C y ensayadas a alta temperatura 250°C, se observó que la adición de elementos de aleación V, Ti y Zr, elevan notablemente la resistencia a la compresión respecto a los resultados obtenidos de la aleación sin aleantes o base (Figura 109).

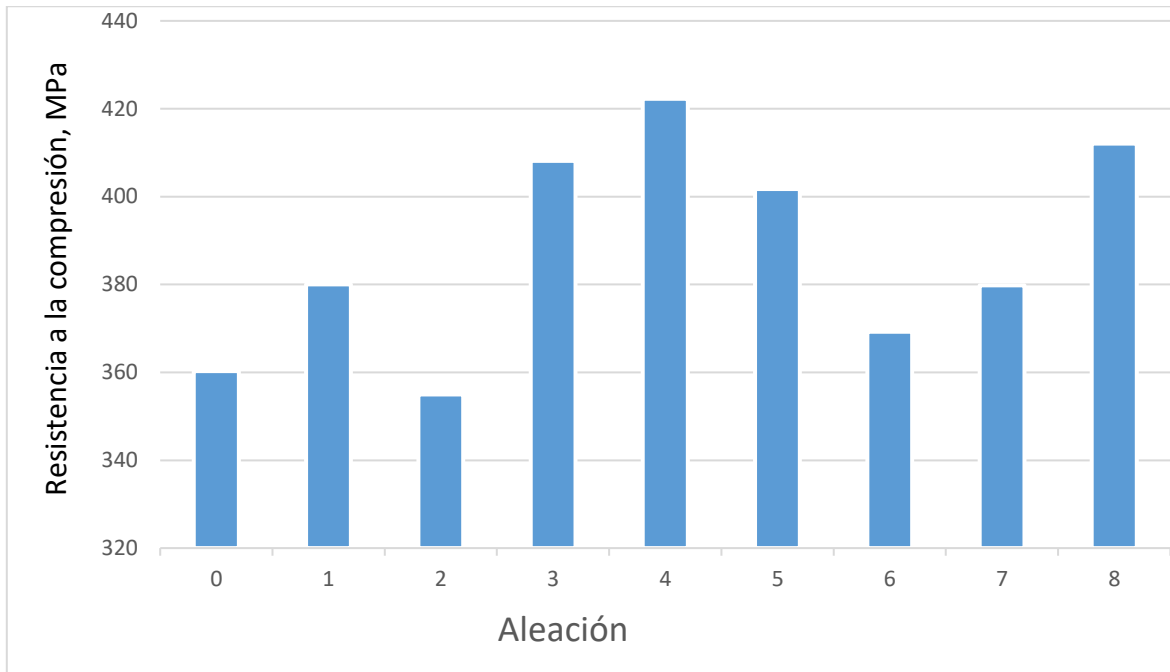


Figura 109. Resistencia a la compresión (MPa), compresión a alta temperatura 250°C en condición de Sobre envejecido.

La aleación número 4 (con una adición de 0.15V-0.30Ti-0.3Zr) presentó un incremento del 16.8 % la resistencia a la compresión respecto de la aleación base. Mientras que las aleaciones 8 y 3 presentaron un incremento del 14.12 y 13%, respectivamente. Confirmando el efecto favorable de estos elementos para la mejora del comportamiento mecánico a altas temperaturas.

## 4.6 Análisis de variables

### Análisis de variables ANOVA

Se realizó un análisis de variables el cual se llevó a cabo mediante el programa Desing-Ease Se realizó en tres partes según la condición de las muestras, primeramente, As cast, enseguida las tratadas térmicamente y por último las sobre envejecidas. Para cada estudio se considera un experimento de tipo factorial de tipo  $2^3$ .

Los puntos a considerar para el análisis de resultados en este estudio son los siguientes:

El "valor F del modelo" implica que el modelo es o no significativo en relación con el ruido. Y el porcentaje que hay de probabilidad de que se produzca un "valor de modelo F" tan grande debido al ruido.

Los valores de "Prob> F" inferiores a 0.0500 indican que los términos del modelo son significativos.

Los valores superiores a 0,1000 indican que los términos del modelo no son significativos.

Los factores considerados son los siguientes:

Elementos añadidos			Porcentaje alto y bajo					
A	V	%	0.15	0.30	-1.000	1.000	0.225	0.075
B	Ti	%	0.15	0.30	-1.000	1.000	0.225	0.075
C	Zr	%	0.15	0.30	-1.000	1.000	0.225	0.075

En el caso de las dos primeras condiciones se trabajó con dos respuestas, compresión a temperatura ambiente y dureza, en cambio en el caso de la tercera condición se dieron tres respuestas añadiendo compresión a alta temperatura. En todos los casos se agregaron primeramente los resultados ya obtenidos en la experimentación tanto de dureza como de compresión. Para acercar los datos a una gráfica se consideró la potencia a la 3 en todos los casos. Los resultados se muestran en seguida:

## Análisis de variables para experimentos de muestras en condición As Cast

Respuesta 1 Compresión a temperatura ambiente

Análisis de varianza [Suma parcial de cuadrados - Tipo III]

Desviación estándar	2.231E+008	$R^2$	0.8309
Media	1.169E+009	Adj $R - S^2$	-0.1837
C.V. %	19.08	Pred $R^2$	-9.8223
PRESS	3.186E+018	Adeq Precisión	2.926

Ecuación final en términos de factores reales:

$$\begin{aligned} &(\text{Compresión T.ambiente})^3 = \\ &+2.41688\text{E}+009 \\ &-4.96982\text{E}+009 \quad * V \\ &-4.86029\text{E}+009 \quad * Ti \\ &-3.59451\text{E}+009 \quad * Zr \\ &+1.31081\text{E}+010 \quad * V * Ti \\ &+8.45184\text{E}+009 \quad * V * Zr \\ &+1.34617\text{E}+010 \quad * Ti * Zr \end{aligned}$$

Aquí podemos observar probabilidad normal de los residuos estandarizados para verificar la normalidad de los residuos, en el análisis de compresión a temperatura ambiente para muestras en condición As cast (Figura 110).



Design-Ease® Software  
(Compresión T.ambiente)<sup>3</sup>

A: V  
B: Ti  
C: Zr  
■ Positive Effects  
■ Negative Effects

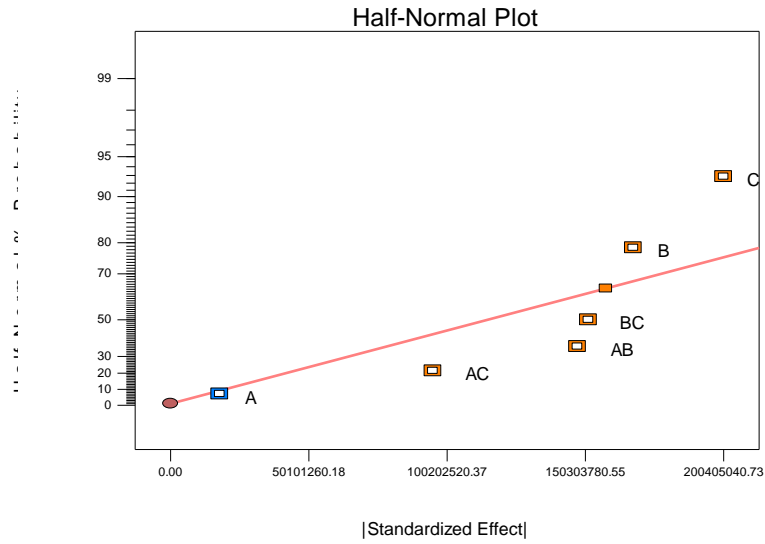


Figura 110. Gráfica de probabilidad normal de los residuos estandarizados para muestras en condición As cast.

La Figura 111 nos muestra la comparación de valores influyentes entre el vanadio y el titanio, en el análisis de compresión a temperatura ambiente para muestras en condición As Cast, en la cual podemos observar que el titanio influye de mayor manera en forma positiva ya que los valores son más altos.

Design-Ease® Software  
Transformed Scale  
(Compresión T.ambiente)<sup>3</sup>

■ 1.62033E+009  
■ 9.95958E+008

X1 = A: V  
X2 = B: Ti

Actual Factor  
C: Zr = 0.22

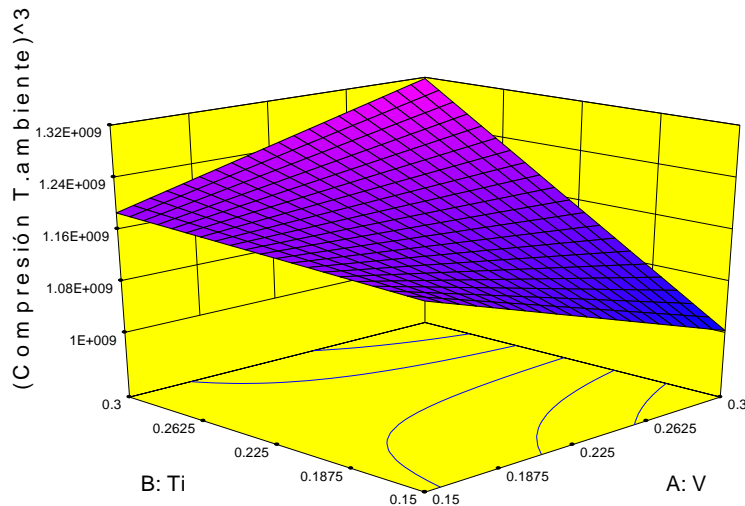


Figura 111. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y el titanio, en condición As Cast.

Ahora bien, la Figura 112 es una gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en el análisis de compresión a temperatura ambiente para muestras en condición As Cast, en este caso se observa mayor beneficio con la adición del zirconio a comparación del vanadio.

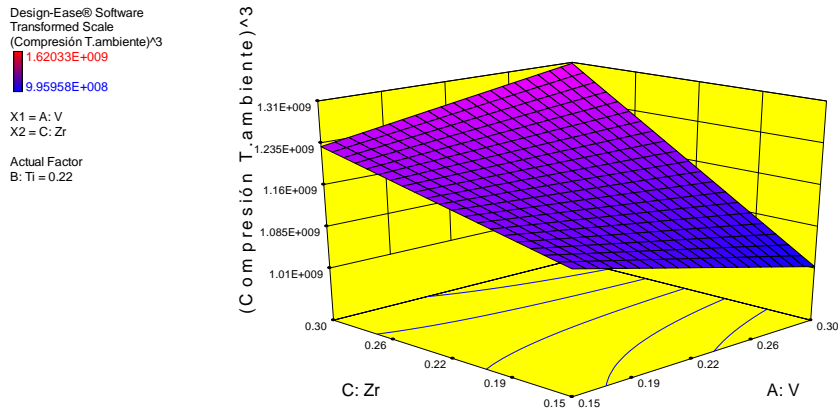


Figura 112. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, condición As Cast.

De igual forma en la Figura 113 se observa la comparación de valores influyentes entre el titanio y el zirconio, en el análisis de compresión a temperatura ambiente para muestras en condición As Cast, donde el titanio muestra mayores resultados, aunque de forma menos notable que en las comparaciones anteriores.

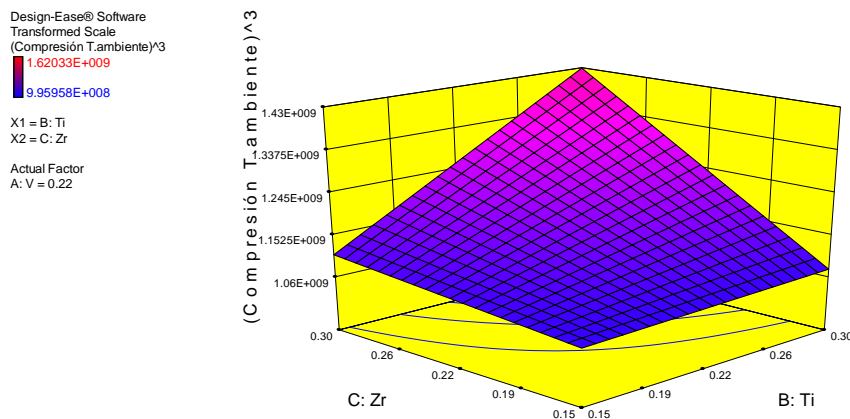


Figura 113. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el titanio y el zirconio, en condición As Cast.

Concluyendo se muestra un gráfico Box-Cox con la interacción simultánea de los tres elementos añadidos, vanadio, titanio y zirconio (Figura 114).

Design-Ease® Software  
 Transformed Scale  
 (Compresión T.ambiente)<sup>3</sup>  
 X1 = A: V  
 X2 = B: Ti  
 X3 = C: Zr

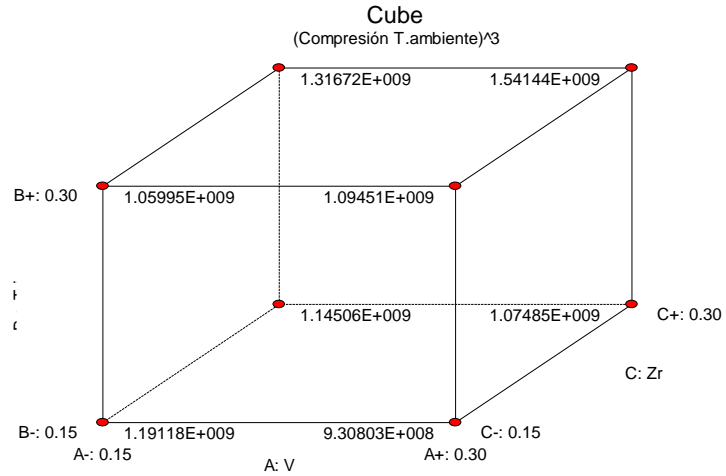


Figura 114. Gráfico de Box-Cox para transformaciones de potencia en el análisis de compresión a temperatura ambiente en condición As Cast.

Respuesta 2 Dureza

Análisis de varianza [Suma parcial de cuadrados - Tipo III]

Desviación estándar	10795.92	$R^2$	0.8966
Media	67614.98	$R - S^2$	0.2764
C.V. %	15.97	Pred $R - S^2$	-5.6160
PRESS	7.459E+009	Adeq Precisión	3.384

Ecuación final en términos de factores reales:

$$\begin{aligned} (\text{Dureza})^3 = & \\ & +34444.51900 \\ & +1.99046\text{E}+005 * V \\ & +8239.12000 * Ti \\ & -1.34127\text{E}+005 * Zr \\ & -5.23274\text{E}+005 * V * Ti \\ & -5623.86667 * V * Zr \\ & +8.58971\text{E}+005 * Ti * Zr \end{aligned}$$

Ahora en la Figura 115 podemos observar probabilidad normal de los residuos estandarizados y verificar la normalidad de los residuos, en el análisis de dureza para muestras en condición As cast.

Design-Ease® Software  
(Dureza)<sup>3</sup>

A: V  
B: Ti  
C: Zr  
■ Positive Effects  
■ Negative Effects

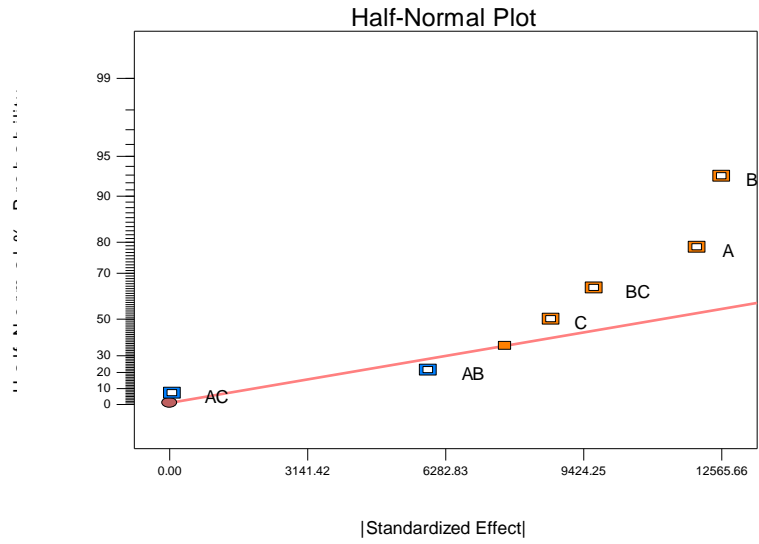


Figura 115. Gráfica de probabilidad normal de los residuos estandarizados en condición As cast.

Ahora para muestras en condición As Cast observamos en la Figura 116 la comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, donde mínimamente el titanio supera al titanio en el análisis de dureza.

Design-Ease® Software  
Transformed Scale  
(Dureza)<sup>3</sup>

■ 89915.4  
■ 49027.9

X1 = A: V  
X2 = B: Ti

Actual Factor  
C: Zr = 0.22

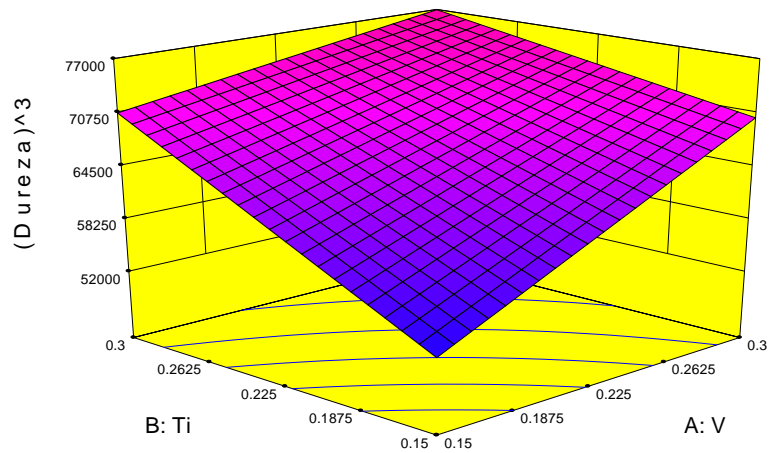


Figura 116. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en condición As Cast.

En la Figura 117 se muestra la comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en el análisis de dureza para muestras en condición As Cast, en la cual el vanadio sea muestra superior.

Design-Ease® Software  
Transformed Scale  
(Dureza)<sup>3</sup>  
89915.4  
49027.9  
X1 = A: V  
X2 = C: Zr  
Actual Factor  
B: Ti = 0.22

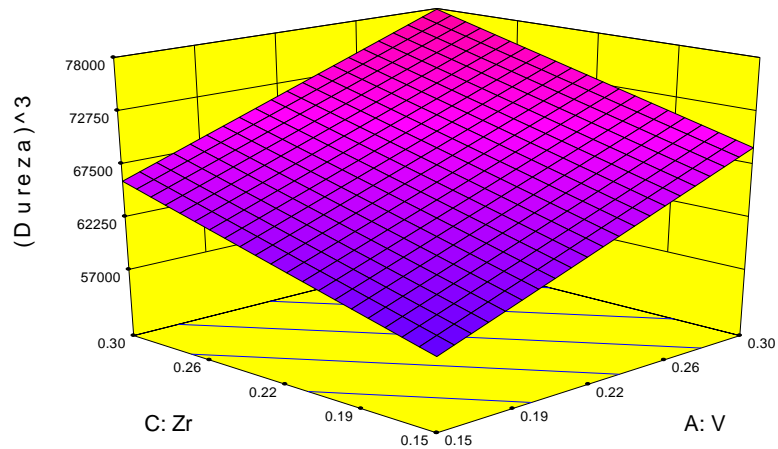


Figura 117. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en condición As Cast.

Y por último en este caso se muestra la gráfica de comparación de valores influyentes entre el titanio y zirconio, en el análisis de dureza para muestras en condición As Cast, donde el titanio es el elemento con un comportamiento más favorable en la aleación (Figura 118).

Design-Ease® Software  
 Transformed Scale  
 (Dureza)<sup>3</sup>  
 89915.4  
 49027.9  
 X1 = B: Ti  
 X2 = C: Zr  
 Actual Factor  
 A: V = 0.22

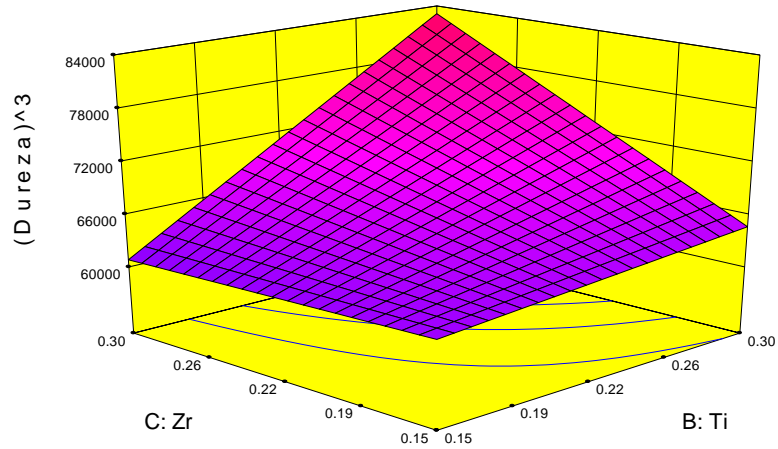


Figura 118. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el titanio y zirconio, en condición As Cast.

Concluyendo se muestra un gráfico Box-Cox con la interacción simultanea de los tres elementos añadidos, vanadio, titanio y zirconio (Figura 119).

Design-Ease® Software  
 Transformed Scale  
 (Dureza)<sup>3</sup>  
 X1 = A: V  
 X2 = B: Ti  
 X3 = C: Zr

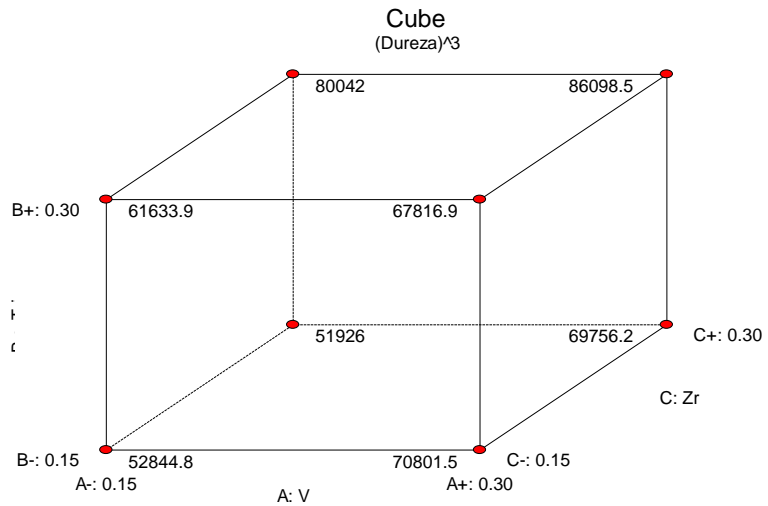


Figura 119. Gráfico de Box-Cox para transformaciones de potencia en el análisis de dureza en condición As Cast.

Análisis de variables para experimentos de muestras en condición T6

Respuesta 1 Compresión a Temperatura .ambiente

Análisis de varianza [Suma parcial de cuadrados - Tipo III]

Desviación estándar	1.474E+008	$R^2$	0.8546
Media	1.275E+009	$R - S^2$	-0.0180
C.V. %	11.56	Pred $R - S^2$	-8.3078
PRESS	1.391E+018	Adeq Precisión	3.207

Ecuación final en términos de factores reales:

$$\begin{aligned}
 (\text{Compresión T.ambiente})^3 &= \\
 &+1.50144\text{E}+009 \\
 &-3.49992\text{E}+009 * V \\
 &-1.67024\text{E}+009 * Ti \\
 &+2.22906\text{E}+009 * Zr \\
 &+1.42071\text{E}+010 * V * Ti \\
 &-1.27641\text{E}+009 * V * Zr \\
 &-4.33322\text{E}+009 * Ti * Zr
 \end{aligned}$$

En seguida en la Figura 120 se muestra la probabilidad normal de los residuos estandarizados y verificar la normalidad de los residuos, en el análisis de compresión a temperatura ambiente para muestras en condición T6.



Design-Ease® Software  
(Compresión T.ambiente)<sup>3</sup>

A: V  
B: Ti  
C: Zr  
■ Positive Effects  
■ Negative Effects

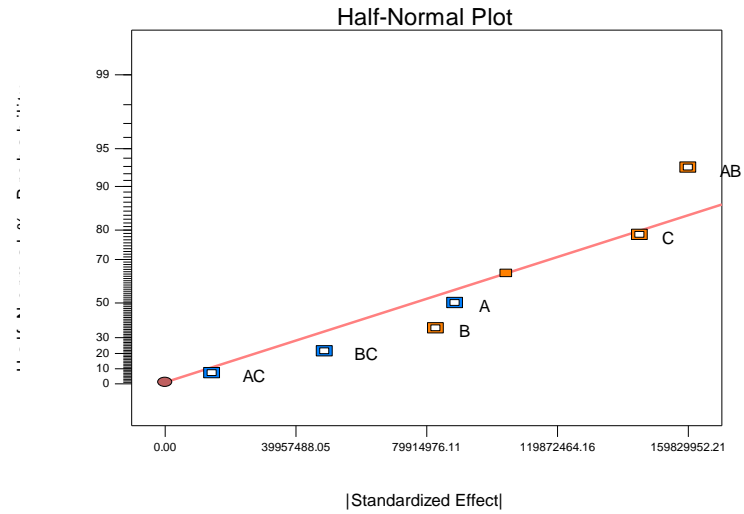


Figura 120. Gráfica de probabilidad normal de los residuos estandarizados en condición T6.

En la Figura 121 podemos observar la comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en el análisis de compresión a temperatura ambiente para muestras en condición T6, en la cual es muy notorio como el titanio supera al vanadio en cuanto a su comportamiento.

Design-Ease® Software  
Original Scale  
Compresión T.ambiente  
■ 1148.26  
■ 1023.38  
X1 = A: V  
X2 = B: Ti  
Actual Factor  
C: Zr = 0.22

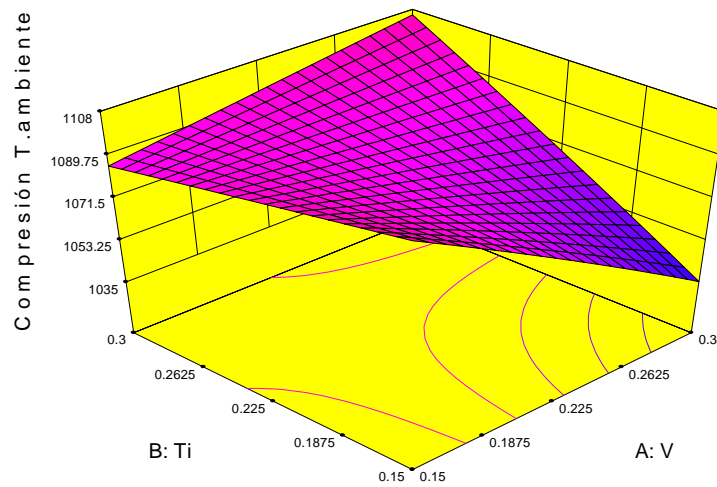


Figura 121. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en condición T6.

De igual forma la comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en el análisis de compresión a temperatura ambiente para muestras en condición T6, mostrada en la Figura 122, en la cual podemos ver como el titanio supera al zirconio.

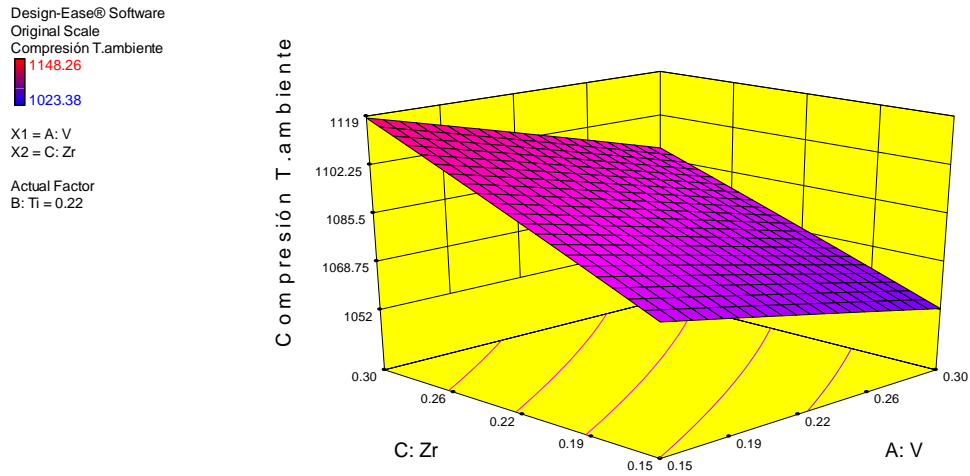


Figura 122. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en condición T6.

Finalizando este caso, tenemos la comparación de valores influyentes entre el titanio y zirconio, en el análisis de compresión a temperatura ambiente para muestras en condición T6, donde el zirconio es superior al titanio (Figura 123).

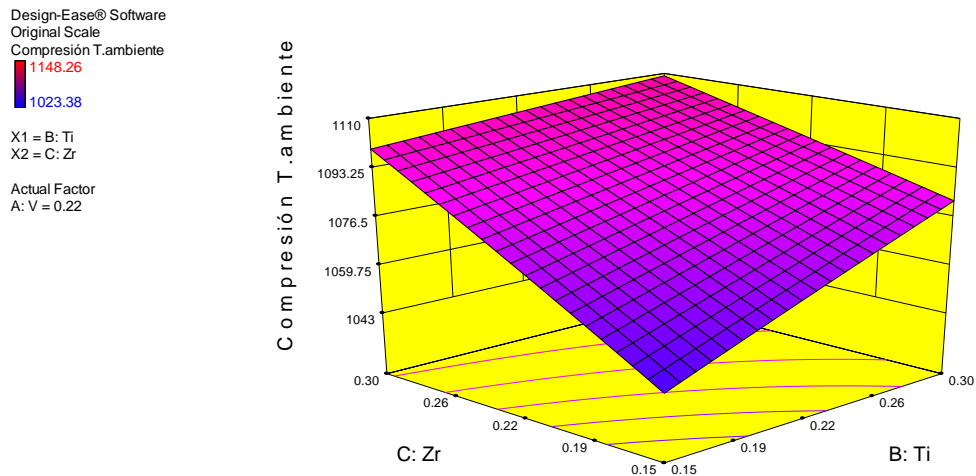


Figura 123. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el titanio y zirconio, en condición T6.

Concluyendo se muestra un gráfico Box-Cox con la interacción simultánea de los tres elementos añadidos, vanadio, titanio y zirconio (Figura 124).

Design-Ease® Software  
 Original Scale  
 Compresión T.ambiente  
 X1 = A: V  
 X2 = B: Ti  
 X3 = C: Zr

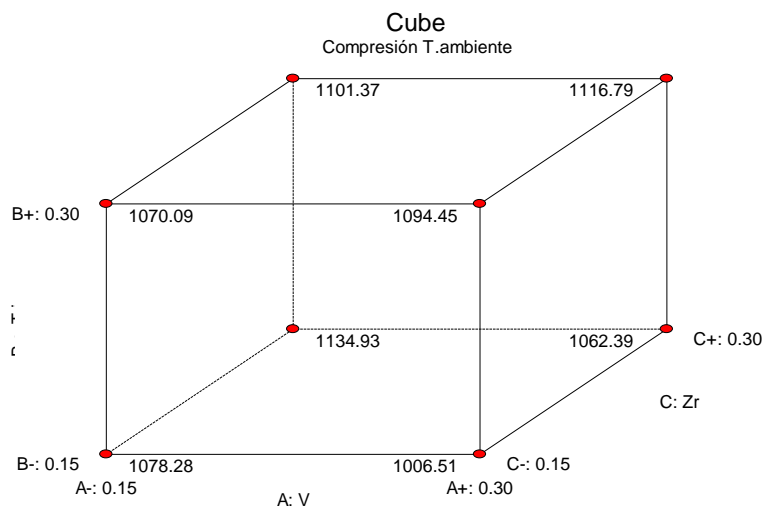


Figura 124. Gráfico de Box-Cox para transformaciones de potencia en el análisis de compresión a temperatura ambiente en condición T6.

Respuesta 2 Dureza

Análisis de varianza [Suma parcial de cuadrados - Tipo III]

Desviación estándar	13622.75	$R^2$	0.8078
Media	24207.23	Adj $R - S^2$	-0.3454
C.V. %	56.28	Pred $R - S^2$	-11.3010
PRESS	1.188E+010	Adeq Precisión	2.020

Ecuación final en términos de factores reales:

$$\begin{aligned} (\text{Dureza})^3 = & \\ & -48213.18738 \\ & +2.83891\text{E}+005 * V \\ & +1.09559\text{E}+005 * Ti \\ & +2.69789\text{E}+005 * Zr \\ & -5.73508\text{E}+005 * V * Ti \\ & -6.05617\text{E}+005 * V * Zr \\ & -3.38078\text{E}+005 * Ti * Zr \end{aligned}$$

A continuación, se muestra en la Figura 125 la probabilidad normal de los residuos estandarizados y verificar la normalidad de los residuos, en el análisis de dureza para muestras en condición T6.

Design-Ease® Software  
(Dureza)<sup>3</sup>

Color points by value of  
(Dureza)<sup>3</sup>:  
43614.2  
8242.41

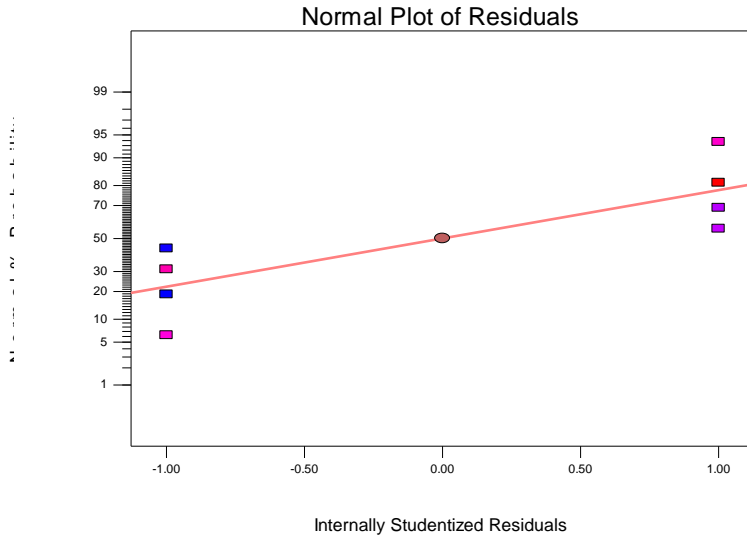


Figura 125. Gráfica de probabilidad normal de los residuos estandarizados en condición T6.

Ahora en el análisis de dureza la comparación de valores influyentes entre el titanio y zirconio, para muestras en condición T6, muestran al zirconio como superior ante en titanio, esto se observa en la Figura 126.

Design-Ease® Software  
Transformed Scale  
(Dureza)<sup>3</sup>

43614.2  
8242.41

X1 = B: Ti  
X2 = C: Zr

Actual Factor  
A: V = 0.22

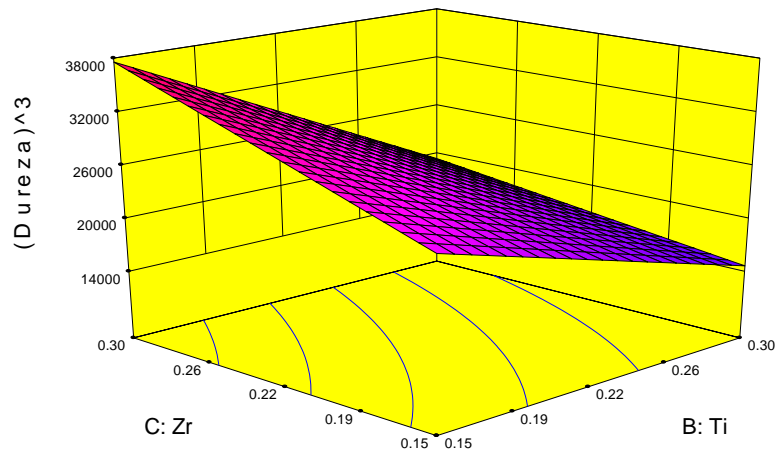


Figura 126. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el titanio y zirconio en condición T6.

En la siguiente Figura 127 podemos observar que el zirconio es más benéfico en la aleación según la comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en condición T6, en el ensayo de dureza.

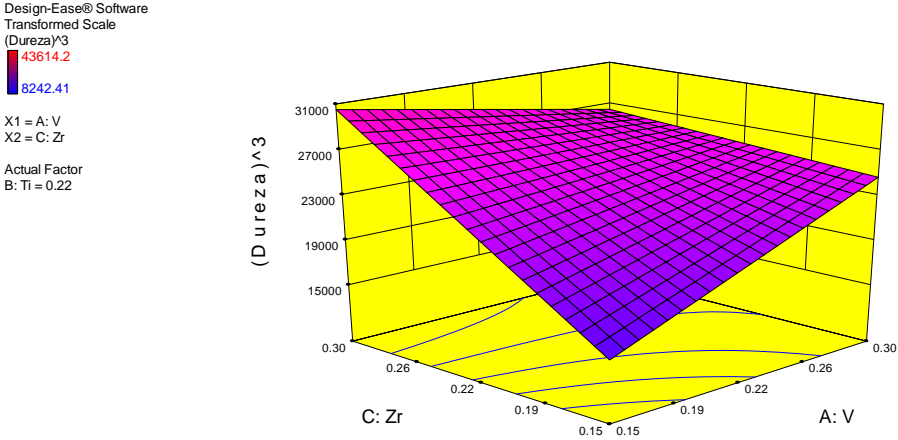


Figura 127. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en condición T6.

Ahora bien, en la figura 128 el vanadio se muestra superior respecto al titanio en esta comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en el análisis de dureza para muestras en condición T6.

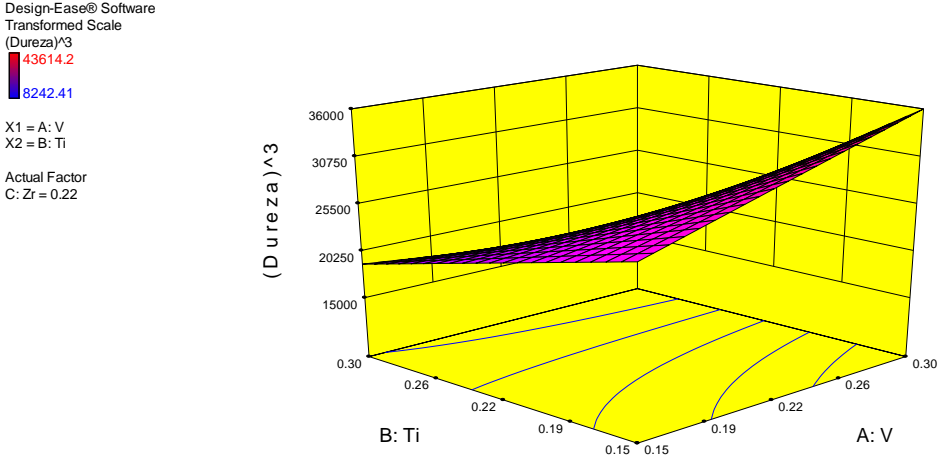


Figura 128. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en condición T6.

Concluyendo se muestra un gráfico Box-Cox con la interacción simultánea de los tres elementos añadidos, vanadio, titanio y zirconio (Figura 129).

Design-Ease® Software  
 Transformed Scale  
 (Dureza)<sup>3</sup>  
 X1 = A: V  
 X2 = B: Ti  
 X3 = C: Zr

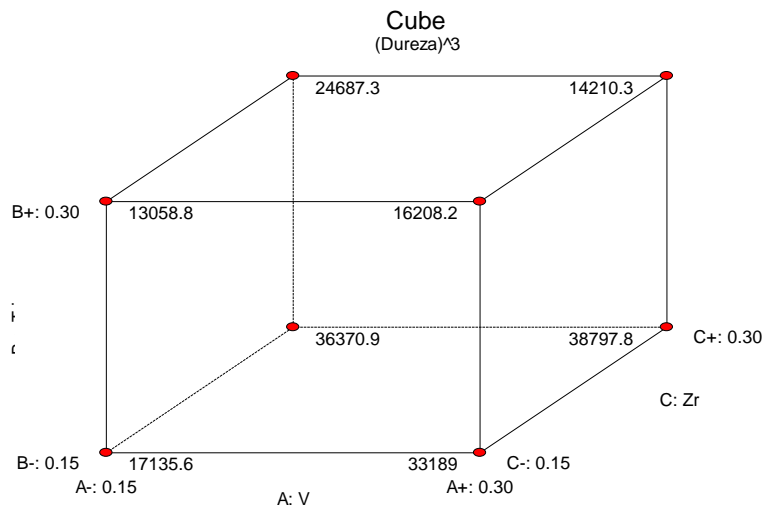


Figura 129. Gráfico de Box-Cox para transformaciones de potencia en el análisis dureza en condición T6.

Análisis de variables para experimentos de muestras en condición de Sobre envejecido.

Respuesta 1 Compresión a. Temperatura ambiente

Análisis de varianza [Suma parcial de cuadrados - Tipo III]

Desviación estándar	3.268E+006	$R^2$	1.0000
Media	1.230E+009	Adj $R - S^2$	0.9997
C.V. %	0.27	Pred $R - S^2$	0.9976
PRESS	6.836E+014	Adeq Precisión	186.012

Ecuación final en términos de factores reales:

$$\begin{aligned}
 &(\text{Compresión T.ambiente})^3 = \\
 &+8.62100\text{E}+008 \\
 &-2.45108\text{E}+009 \quad * V \\
 &+5.50167\text{E}+008 \quad * Ti \\
 &+2.44166\text{E}+009 \quad * Zr \\
 &+1.12118\text{E}+010 \quad * V * Ti \\
 &-1.96278\text{E}+009 \quad * V * Zr \\
 &-4.38960\text{E}+009 \quad * Ti * Zr
 \end{aligned}$$

Ahora en la siguiente Figura 130 observamos la probabilidad normal de los residuos estandarizados y verificar la normalidad de los residuos, en el análisis de compresión a temperatura ambiente para muestras en condición de sobre envejecido.



Design-Ease® Software  
(Compresión T.ambiente)<sup>3</sup>

A: V  
B: Ti  
C: Zr  
■ Positive Effects  
■ Negative Effects

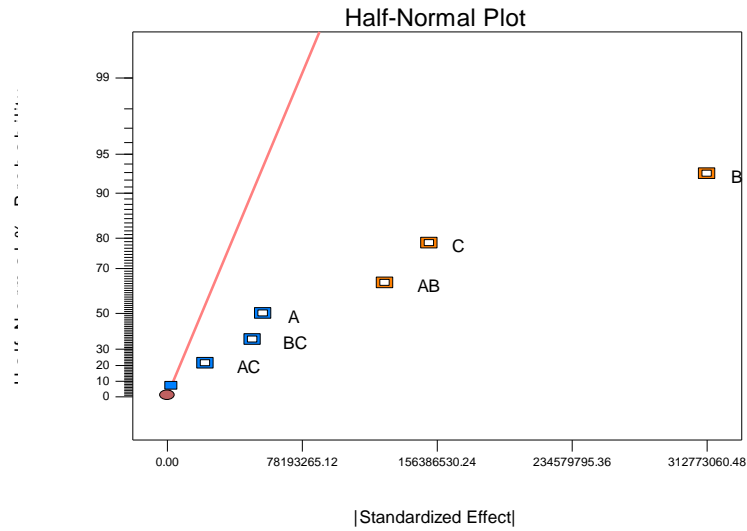


Figura 130. Probabilidad normal de los residuos estandarizados condición de sobre envejecido.

En la siguiente Figura 131 podemos observar la comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en el análisis de compresión a temperatura ambiente para muestras en condición de sobre envejecido, en la que claramente el titanio aporta mayor resistencia a la aleación.

Design-Ease® Software  
Original Scale  
Compresión T.ambiente

■ 1134.58  
■ 962.56

X1 = A: V  
X2 = B: Ti

Actual Factor  
C: Zr = 0.22

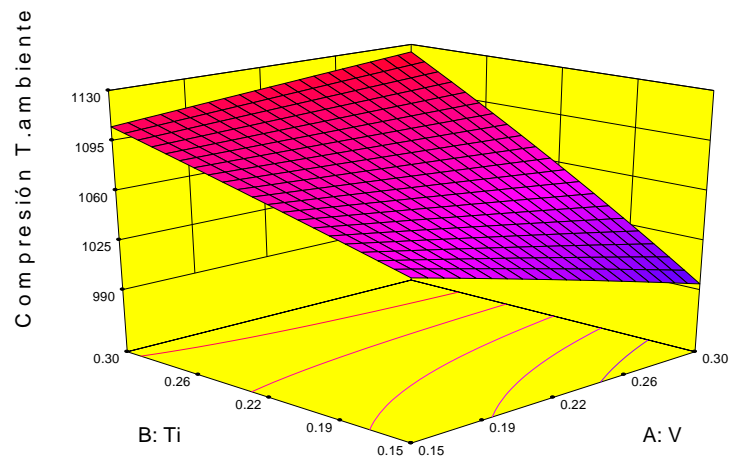


Figura 131. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en condición de sobre envejecido.

Luego en la Figura 132 observamos la comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en el análisis de compresión a temperatura ambiente para muestras en condición de sobre envejecido, en la que el zirconio supera al vanadio.

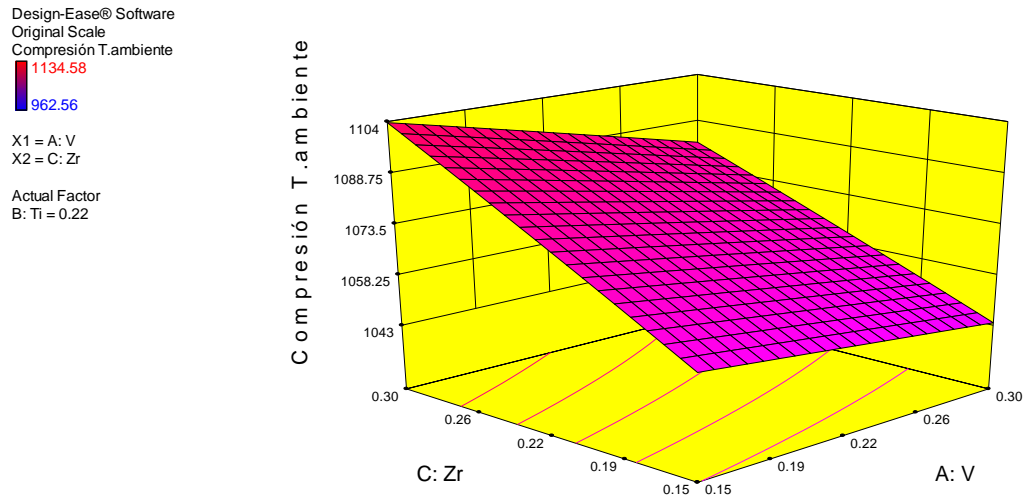


Figura 132. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en condición de sobre envejecido.

Al final de esta prueba observamos como el titanio es más resistente en comparación al zirconio como se ve en la Figura 133, que muestra la comparación de valores influyentes entre el titanio y el zirconio, en el análisis de compresión a temperatura ambiente para muestras en condición de sobre envejecido.

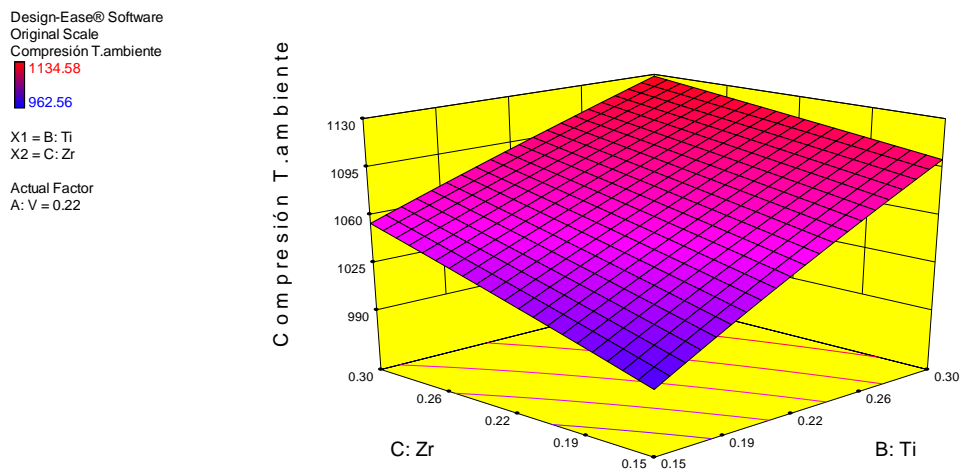


Figura 133. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el titanio y el zirconio, en condición de sobre envejecido.

Concluyendo se muestra un gráfico Box-Cox con la interacción simultánea de los tres elementos añadidos, vanadio, titanio y zirconio (Figura 134).

Design-Ease® Software  
 Original Scale  
 Compresión T.ambiente  
 X1 = A: V  
 X2 = B: Ti  
 X3 = C: Zr

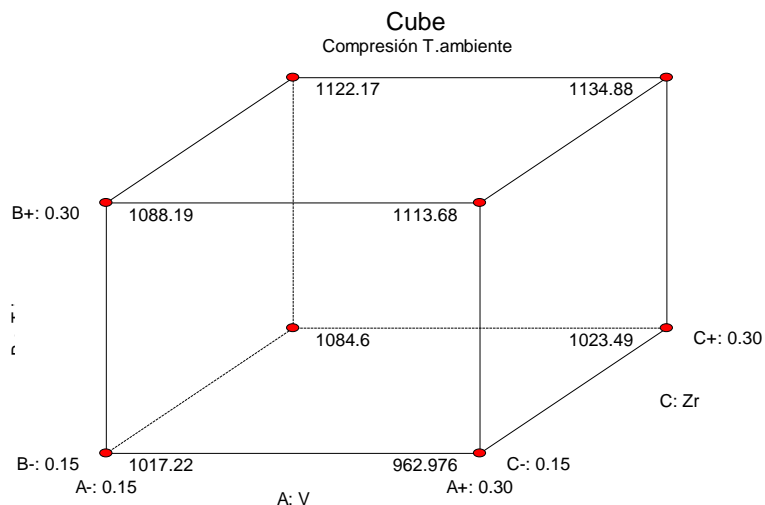


Figura 134. Gráfico de Box-Cox para transformaciones de potencia en el análisis de compresión a temperatura ambiente en condición de sobre envejecido.

Respuesta 2 Compresión a Alta Temperatura.

Análisis de varianza [Suma parcial de cuadrados - Tipo III]

Desviación estándar	4.321E+006	$R^2$	0.9766
Media	6.035E+007	Adj $R - S^2$	0.8365
C.V. %	7.16	Pred $R - S^2$	-0.4951
PRESS	1.195E+015	Adeq Precisión	8.318

Ecuación final en términos de factores reales:

$$\begin{aligned} (\text{Compresión Alta T.})^3 &= \\ &+6.09016\text{E}+007 \\ &+1.48159\text{E}+008 * V \\ &+2.35116\text{E}+007 * Ti \\ &-2.56799\text{E}+008 * Zr \\ &-7.58071\text{E}+008 * V * Ti \\ &+7.77384\text{E}+007 * V * Zr \\ &+1.04777\text{E}+009 * Ti * Zr \end{aligned}$$

La siguiente Figura 135 muestra la probabilidad normal de los residuos estandarizados y verificar la normalidad de los residuos, en el análisis de compresión a alta temperatura para muestras en condición de sobre envejecido.

Design-Ease® Software  
(Compresión Alta T.)<sup>3</sup>

A: V  
B: Ti  
C: Zr  
■ Positive Effects  
■ Negative Effects

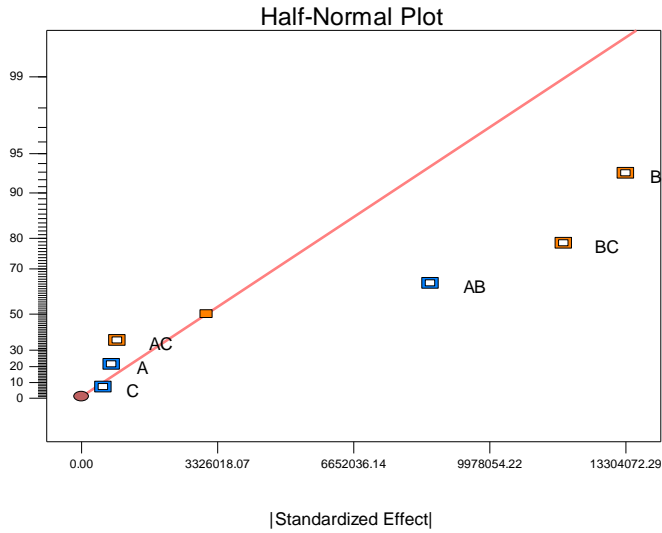


Figura 135. Gráfica de probabilidad normal de los residuos para muestras en condición de sobre envejecido.

La Figura 136 muestra la comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en el análisis de compresión a alta temperatura para muestras en condición de sobre envejecido, donde el zirconio presenta mejor comportamiento respecto al vanadio.

Design-Ease® Software  
Original Scale  
Compresión Alta T.

■ 422.27  
■ 354.98

X1 = A: V  
X2 = C: Zr  
Actual Factor  
B: Ti = 0.22

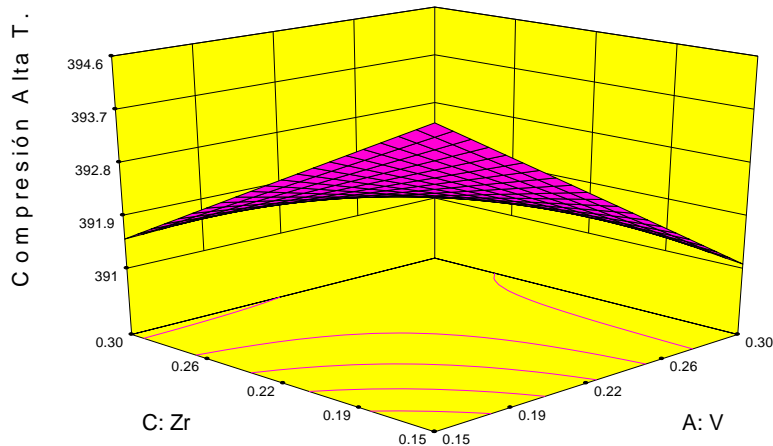


Figura 136. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en condición de sobre envejecido.

Enseguida en la Figura 137 tenemos la comparación de valores influyentes entre el titanio y zirconio, en el análisis de compresión a alta temperatura para muestras en condición de sobre envejecido, en la cual el titanio supera con bastante al zirconio en su comportamiento mecánico.

Design-Ease® Software  
Original Scale  
Compresión Alta T.  
422.27  
354.98  
X1 = B: Ti  
X2 = C: Zr  
Actual Factor  
A: V = 0.22

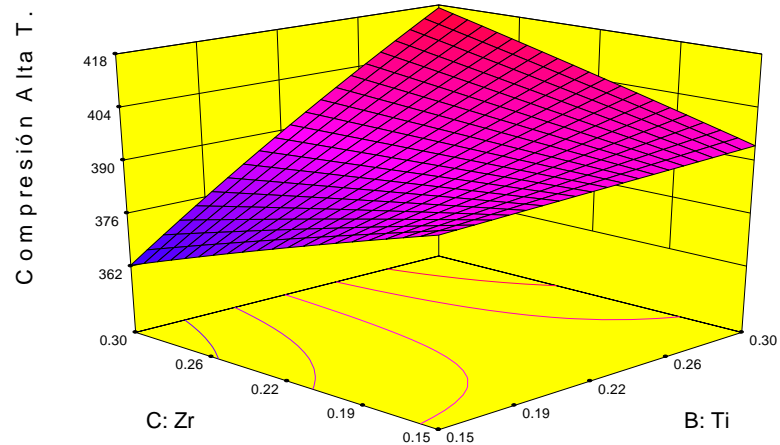


Figura 137. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el titanio y zirconio, en condición de sobre envejecido.

De la misma forma la comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en el análisis de compresión a alta temperatura para muestras en condición de sobre envejecido, muestra superior al titanio sobre el vanadio, lo cual lo podemos observar a continuación en la Figura 138.

Design-Ease® Software  
 Original Scale  
 Compresión Alta T.  
 422.27  
 354.98  
 X1 = A: V  
 X2 = B: Ti  
 Actual Factor  
 C: Zr = 0.22

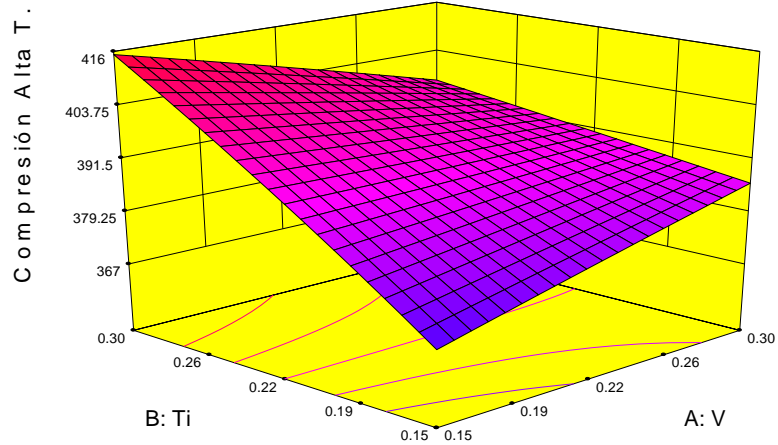


Figura 138. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en condición de sobre envejecido.

Concluyendo se muestra un gráfico Box-Cox con la interacción simultanea de los tres elementos añadidos, vanadio, titanio y zirconio (Figura 139).

Design-Ease® Software  
 Original Scale  
 Compresión Alta T.  
 X1 = A: V  
 X2 = B: Ti  
 X3 = C: Zr

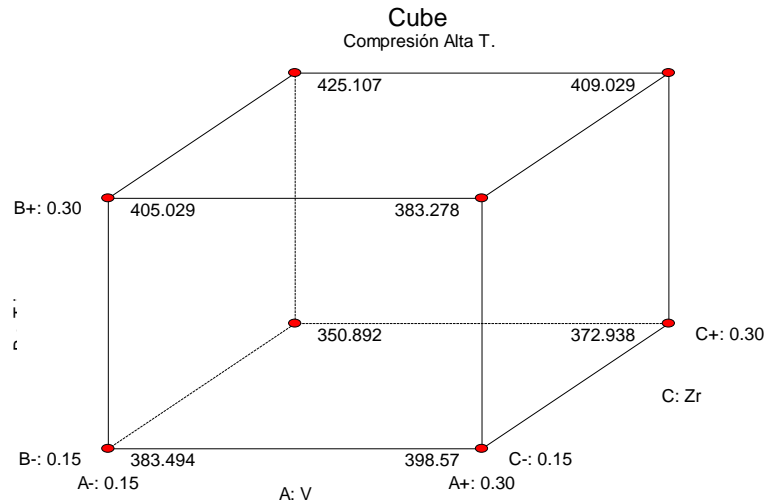


Figura 139. Gráfico de Box-Cox para transformaciones de potencia en el análisis de compresión a alta temperatura en condición de sobre envejecido.

Respuesta 3 Dureza

Análisis de varianza [Suma parcial de cuadrados - Tipo III] Sum of

Desviación estándar	5350.26	$R^2$	0.9069
Media	11449.46	Adj $R - S^2$	0.3482
C.V. %	46.73	Pred $R - S^2$	-4.9591
PRESS	1.832E+009	Adeq Precisión	3.675

Ecuación final en términos de factores reales:

$$\begin{aligned} (\text{Dureza})^3 = & \\ & -4627.43888 \\ & +1.20001\text{E}+005 * V \\ & +1.23649\text{E}+005 * Ti \\ & -1.13018\text{E}+005 * Zr \\ & -8.80389\text{E}+005 * V * Ti \\ & +3.17239\text{E}+005 * V * Zr \\ & +3.00131\text{E}+005 * Ti * Zr \end{aligned}$$

En la Figura 140 se puede ver la probabilidad normal de los residuos estandarizados y verificar la normalidad de los residuos, en el análisis de dureza para muestras en condición de sobre envejecido.



Design-Ease® Software  
(Dureza)<sup>3</sup>

A: V  
B: Ti  
C: Zr  
■ Positive Effects  
■ Negative Effects

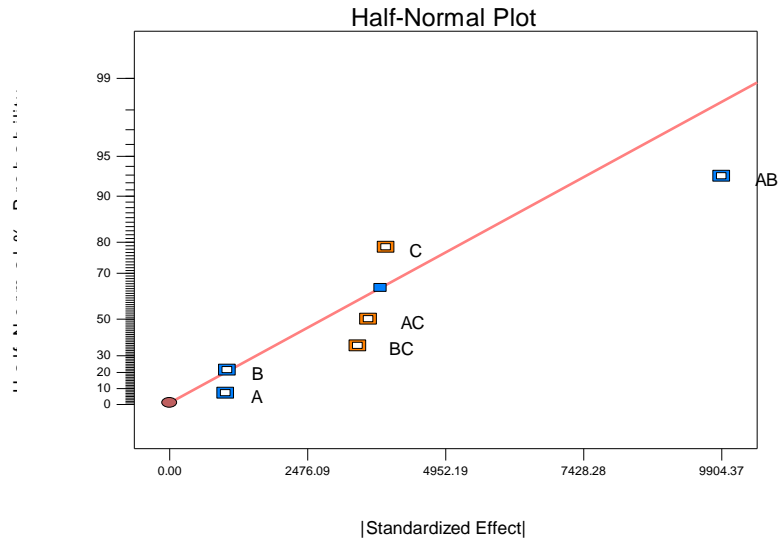


Figura 140. Gráfica de probabilidad normal de los residuos estandarizados en condición de sobre envejecido.

En la Figura 141 podemos observar la comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en el análisis de dureza para muestras en condición de sobre envejecido, donde el titanio se muestra superior al vanadio, aunque de forma casi insignificante.

Design-Ease® Software  
Transformed Scale  
(Dureza)<sup>3</sup>

■ 20346.4  
■ 1953.13

X1 = A: V  
X2 = B: Ti

Actual Factor  
C: Zr = 0.22

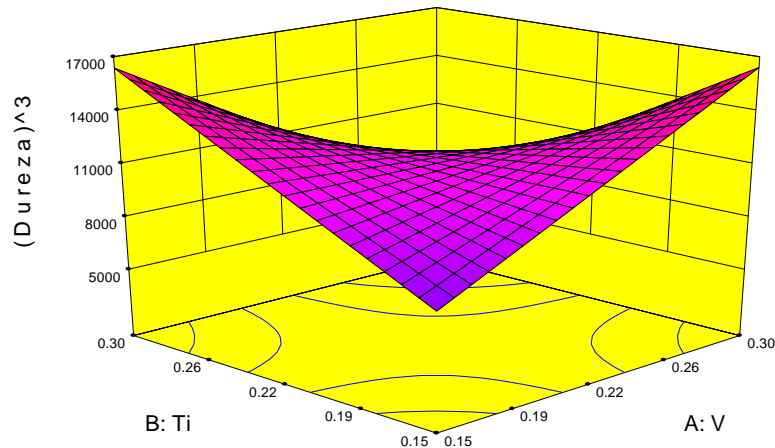


Figura 141. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y titanio, en condición de sobre envejecido.

La comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en el análisis de dureza para muestras en condición de sobre envejecido, se observa en la Figura 142, en la cual el zirconio es superior al vanadio.

Design-Ease® Software  
Transformed Scale  
(Dureza)<sup>3</sup>  
20346.4  
1953.13  
X1 = A: V  
X2 = C: Zr  
Actual Factor  
B: Ti = 0.22

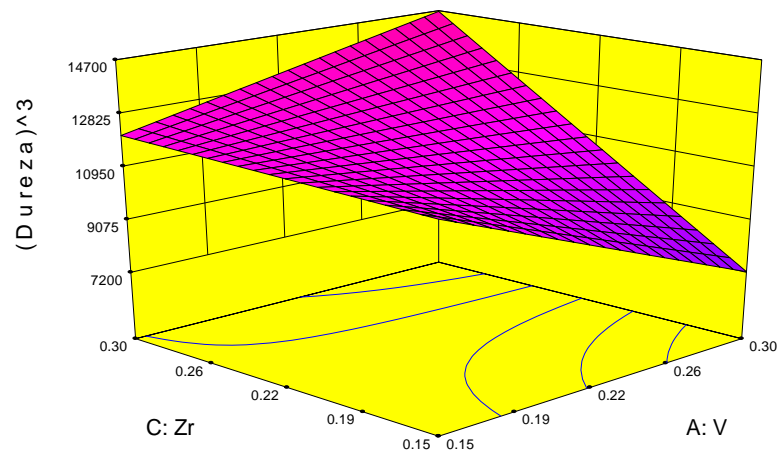


Figura 142. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el vanadio y zirconio, en condición de sobre envejecido.

Enseguida en la Figura 143 observamos la comparación de valores influyentes entre el titanio y zirconio, en el análisis de dureza para muestras en condición de sobre envejecido, donde el zirconio prevalece superior en este caso sobre el titanio.

Design-Ease® Software  
 Transformed Scale  
 (Dureza)<sup>3</sup>  
 20346.4  
 1953.13  
 X1 = B: Ti  
 X2 = C: Zr  
 Actual Factor  
 A: V = 0.22

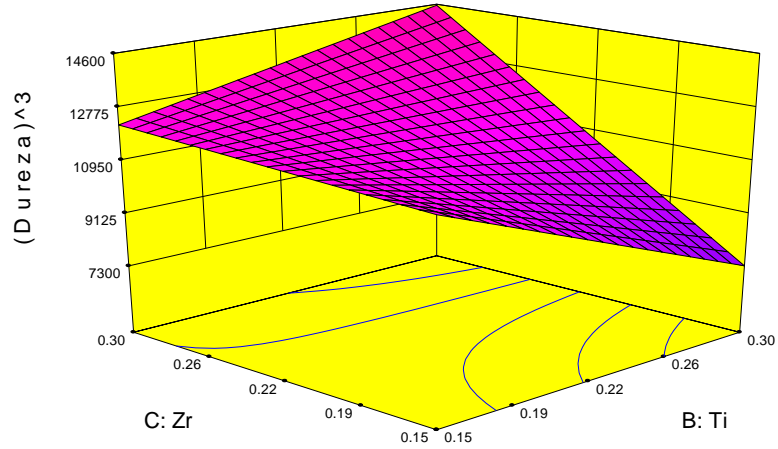


Figura 143. Gráfica de comparación de valores influyentes entre el titanio y zirconio, en condición de sobre envejecido.

Concluyendo se muestra un gráfico Box-Cox con la interacción simultanea de los tres elementos añadidos, vanadio, titanio y zirconio (Figura 144).

Design-Ease® Software  
 Transformed Scale  
 (Dureza)<sup>3</sup>  
 X1 = A: V  
 X2 = B: Ti  
 X3 = C: Zr

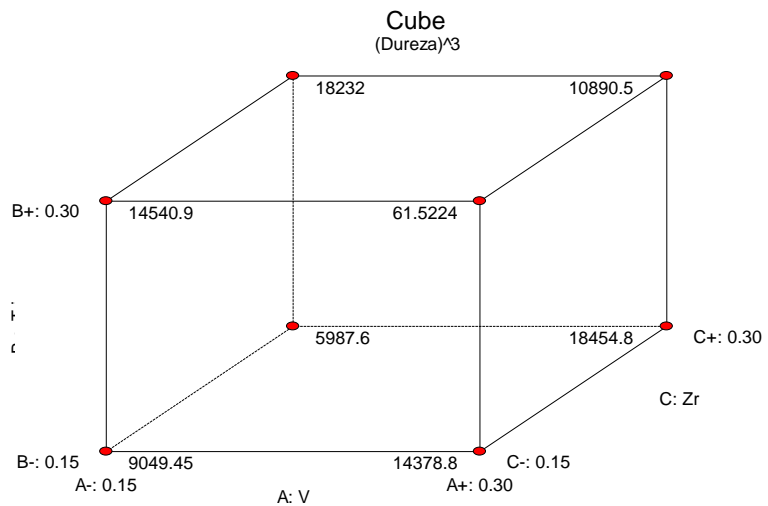


Figura 144. Gráfico de Box-Cox para transformaciones de potencia en el análisis de dureza en condición de sobre envejecido

En este análisis de obtuvo el análisis de varianza, la ecuación final en términos de factores reales, la gráfica de probabilidad normal de residuos, así como la comparación de valores influyentes y el gráfico Cox-Box para transformaciones de potencia, de la Resistencia a la compresión a temperatura ambiente y de la dureza, para cada una de las tres condiciones As cast, T6 y sobre envejecido. Así mismo, en la condición de sobre envejecido se analizó la resistencia a la compresión a alta temperatura.

En la Tabla 15 podemos observar el resumen de las ecuaciones en términos reales que se obtuvieron en los cálculos numéricos de este análisis.

Tabla 15. Ecuaciones finales en términos de factores reales obtenidas en Design-Ease 7.1.

Respuesta / Condicion	As Cast	Tratada termicamente(T6)	Sobre envejecido
(Compresión Tem. ambiente)^3	+1.31081E+010 * V * Ti +8.45184E+009 * V * Zr +1.34617E+010* Ti * Zr	+1.42071E+010 * V * Ti -1.27641E+009 * V * Zr -4.33322E+009 * Ti * Zr	+1.12118E+010 * V * Ti -1.96278E+009 * V * Zr -4.38960E+009 * Ti * Zr
(Compresión Alta Tem.)^3	-----	-----	-7.58071E+008 * V * Ti +7.77384E+007 * V * Zr +1.04777E+009 * Ti * Zr
(Dureza)^3	-5.23274E+005 * V * Ti -5623.86667 * V * Zr +8.58971E+005 * Ti * Zr	-5.73508E+005 * V * Ti -6.05617E+005 * V * Zr -3.38078E+005 * Ti * Zr	-8.80389E+005* V * Ti +3.17239E+005 * V * Zr +3.00131E+005 * Ti * Zr

Como puede observarse las ecuaciones obtenidas son considerando dos variables, al igual que las gráficas de comparación, se hizo el ejercicio para tratar de obtener ecuación con las tres variables involucradas al mismo tiempo, forzando el análisis y aunque se logró, los resultados se descartaron ya que no eran significativos ni confiables.

## Capítulo V Conclusiones.

La investigación realizada sobre el efecto de la adición de vanadio, titanio y zirconio sobre la aleación Al-7Si-0.5Cu se llevó a cabo de manera satisfactoria, analizando el comportamiento en las tres condiciones propuestas, as cast, con tratamiento térmico y con sobre envejecido, con el fin de analizar la microestructura y determinar la resistencia a la compresión a temperatura ambiente y dureza, mientras que para las aleaciones en condición de sobre envejecido a 250°C por 100 h, se obtuvo la resistencia a la compresión a alta temperatura de 250°C, lo anterior tratando de encontrar una mejora de la aleación ya mencionada y determinar los porcentajes de V, Ti y Zr más adecuados. Después del estudio realizado podemos concluir lo siguiente:

Las aleaciones de estudio fueron realizadas de manera adecuada con un rango de diferencia apropiado entre el valor mínimo y el máximo en cuanto a los elementos añadidos de V, Ti y Zr, para que de esta forma fuera notable cuál de los elementos contribuye de mejor manera a la elevación de propiedades mecánicas de la aleación Al-7Si-0.5Cu.

En cuanto al análisis microestructural de las aleaciones se puede mencionar que la aleación base está formada por eutéctico Al-Si, partículas de Al-Cu y CuAl<sub>2</sub>, en una matriz de aluminio. En general, al añadir V, Ti y Zr en la aleación Al-7Si-0.5Cu, modificó el tamaño y morfología del silicio eutéctico en la condición de As Cast, obteniendo en consecuencia una microestructura fina y dispersa en las condiciones de tratamiento térmico y muy en particular en la condición de sobre envejecido, donde se observa que su adición, retiene el crecimiento de partículas de silicio eutéctico durante el sobre envejecido, mejorando con certeza su comportamiento mecánico en esa condición.

El análisis de DRX mostró la presencia de Fe, Al, Ti, Si, CuFe en las tres condiciones estudiadas coladas, tratadas térmicamente y sobre envejecidas. En aleación base o de referencia se observaron además las fases AlCu y CuAl<sub>2</sub>. Por otra parte, durante el tratamiento térmico ni en el sobre envejecido, se detectó la formación de otras fases. El análisis por DRX no mostró la presencia de fases con V, Ti y Zr, quizá debido a su bajo porcentaje.

En el análisis por EDX, se observó que: en la condición colada, la microestructura de las aleaciones experimentales está formada por una matriz con elementos Si, V, Ti, Fe, Cu y Zr en solución sólida, además de silicio eutéctico. Mientras que en las aleaciones 1, 4 y 8 se identificaron además fases complejas como: AlSiTiFeCuZr, AlSiFeCuZr, AlSiZr y AlSiTiVZr en condición colada, tratada térmicamente y sobre envejecida. Mismas fases que serán fundamentales en el comportamiento mecánico de estas aleaciones.

La caracterización metalográfica con SEM mostró que: en general, el tratamiento térmico aplicado, en su parte de tratamiento por solución, disuelve en parte el silicio eutéctico y elementos de aleación en la matriz de aluminio, además esferoidiza las partículas de silicio no disueltas. Con el tratamiento térmico se produce también la precipitación submicroscópica de partículas coherentes durante el envejecido.

El sobre envejecido de las diversas aleaciones experimentales favorece el crecimiento de partículas de silicio y otros tipos de fases presentes.

Con el incremento en los contenidos de aleación, V, Ti y Zr en las aleaciones coladas, se formó una mayor cantidad y tamaño de partículas brillantes irregulares caracterizadas por EDX como AlSiTiVZr, localizadas entre el eutéctico Al-Si.

La presencia de poros en las aleaciones, aunque fue mínima, no influyó sobre los resultados de compresión, debido a la característica del ensayo. En cuanto a la dureza, tampoco afectaron pues se hicieron las pruebas en zonas libres de porosidad. En general, la adición de V, Ti y Zr en la aleación colada Al-7Si-0.5Cu, elevó su dureza.

Respecto de los ensayos de *compresión a temperatura ambiente* en condición colada, la aleación recomendable es la aleación 8, (Al-7Si-0.5Cu-0.3V-0.3Ti-0.3Zr), ya que fue la que presentó mayor resistencia a la compresión y deformación que la aleación de referencia Al-7Si-0.5Cu.

Las aleaciones 4 (Al-7Si-0.5Cu-0.15V-0.30Ti-0.30Zr), 7 (Al-7Si-0.5Cu-0.30V-0.30Ti-0.15Zr) y 8 (Al-7Si-0.5Cu-0.30V-0.30Ti-0.30Zr) en condición de sobre envejecido (aleaciones coladas y tratadas térmicamente T6 que se sometieron a 250°C por 100 h) presentaron un aumento en el esfuerzo máximo de compresión y deformación en compresión, así como menor módulo de elasticidad, respecto de la aleación base.

Esto significa que el añadir elementos aleantes Ti, V y Zr es benéfico para el mejoramiento del comportamiento mecánico de la aleación base Al-7Si-0.5Cu en la condición de sobre envejecido, probado a temperatura ambiente.

Los resultados de las pruebas de compresión a temperatura ambiente muestran que la aleación más recomendable es la aleación 8 (Al-7Si-0.5Cu-0.30V-0.30Ti-0.30Zr), ya que presentó mejores propiedades en compresión que la aleación base en las tres condiciones, colada, tratada térmicamente y sobre envejecida.

En las aleaciones sobre envejecidas por 100 h a 250°C y *ensayadas a alta temperatura* 250°C, la aleación más recomendable resultó ser la aleación número 4 (Al-7Si-0.5Cu-0.15V-0.30Ti-0.30Zr) ya que presentó un incremento del 16.8 % la resistencia a la compresión respecto de la aleación base, aunque también mostraron un comportamiento sobresaliente las aleaciones 8 (Al-7Si-0.5Cu-0.30V-0.30Ti-0.30Zr) y 3 (Al-7Si-0.5Cu-0.15V-0.30Ti-0.15Zr) que presentaron un incremento del 14.12 y 13%, respectivamente.

Estos resultados confirman el efecto favorable de la adición de elementos de aleación V, Ti y Zr, ya que elevan notablemente la resistencia a la compresión respecto de la aleación sin aleantes, aleación Al-7Si-0.5Cu.

De acuerdo con el funcionamiento de los cabezales de motor, los cuales están sometidos a altas temperaturas durante su tiempo de trabajo, se recomienda usar la aleación 4 (*Al-7Si-0.5Cu-0.15V-0.30Ti-0.30Zr*), aunque no se descarta la aleación 8 (*Al-7Si-0.5Cu-0.30V-0.30Ti-0.30Zr*) por su buen comportamiento también en la compresión a temperatura ambiente.

Por otra parte, el estudio de análisis de variable realizado en el software Design-Ease 7.1, podemos mencionar que, en general, el titanio es el elemento que contribuye en mayor cantidad a la mejora de las propiedades de compresión en las aleaciones experimentales, así mismo se obtuvieron las ecuaciones para determinar la resistencia a la compresión a temperatura ambiente, a alta temperatura, además de la dureza.

## Trabajos futuros

Existe una variedad de oportunidades para mejorar este tipo de aleaciones, comenzando con condiciones de fundición más controladas, como lo es un proceso de fundición a presión, que replique el proceso más frecuente que se somete este tipo de aleaciones en la industria automotriz, hasta condiciones de desgasificado controlado y más eficientes para el mejor control de porosidades.

También es conveniente experimentar con un porcentaje distinto de los elementos añadidos, Vanadio, Titanio y Zirconio dando prioridad al titanio ya que es el elemento que ha resultado aportar un incremento mayor en la resistencia a la compresión y dureza.

Es recomendable incrementar el número de ensayos de compresión o bien, complementar con ensayos de tensión para obtener mayor cantidad de datos estadísticos para todas las aleaciones, en especial en condiciones de alta temperatura, así como un análisis más detallado del comportamiento de dureza.

Se sugiere comprobar las ecuaciones obtenidas en el análisis de variables en la práctica considerando los rangos de valores ya propuestos de los elementos añadidos.

El siguiente paso será evaluar las aleaciones 4 (Al-7Si-0.5Cu-0.15V-0.30Ti-0.30Zr) y 8 (Al-7Si-0.5Cu-0.30V-0.30Ti-0.30Zr) en cabezales de motor reales, o bien en alguna simulación muy cercana a la realidad.



## Bibliografía

- [1] John L. Jorstad, Reynolds Metals Co. Wayne M. Rasmussen, The American Foundrymen's Society A. Aluminum casting technology, 2<sup>nd</sup>, Edition edited by, Donna L. Zalensas, AFS. 2001.[1]
- [2] Douglas C. Montgomery, Diseño y análisis de experimentos. Arizona State University, Grupo Editorial Iberoamerica. 1991.
- [3] Cozzarín, Ana L.; Davanzo, Juan A.; Echarri; Juan M.; González, Alfredo C. Visualización de maclas en partículas de silicio en aleaciones de aluminio para moldeo. Laboratorio de Investigaciones de Metalurgia Física "Ing. Gregorio Cusminsky", LIMF Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería. Calle 48 y 116, B1900TAG Email acozzarin@ing.unlp.edu.ar. 2013.
- [4] Zhao, H.B. Liu, C.Y. Zhao. Experimental study on the cycling stability and corrosive property of Al-Si alloys as phase change materials in high-temperature heat storage Y. Institute of Engineering Thermo-Physics, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 2002, China.
- [5] Pascal Paillard, Yann Borjon-Piron, Saïd Beroual a. bun, Effects of heat treatment and addition of small amounts of Cu and Mg on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu and Al-Si-Mg cast alloys, Departamento de Ingeniería Mecánica, LMSM, Universidad de Biskra, Biskra, 07000, BP 145, Argeliab Instituto de Materiales Jean Rouxel, IMN e ID2M, UMR 6502, Nantes, 44306, BP 50609, Francia. 2019.
- [6] M. Garat, G. Laslaz, Improved Aluminum Alloys for Common Rail Diesel Cylinder Heads, AFS Transactions 2007, paper 07-002(02).
- [7] Sancho José, Verdeja Luis Felipe, Ballester Antonio .Metalurgia extractiva, volumen II, Procesos de obtención, Ciencias químicas: químicas básicas, Editorial síntesis. 1999.
- [8] Jifei Sun, Boyuan Ban, Jingweu Li, Mengnan Wei, Qi Wang, Jian Chen. Porous Si/C anode materials by Al-Si dealloying method with PEA surfactant assisted cross-linked carbon coating for lithium-ion battery applications. El Sevier. 2019.
- [9] Patrik Huter, Philipp Renhart, Stefan Oberfrank, Martin Schwab, Florian Grun, Bernhard Stauder. High-and low-cycle fatigue influence of silicon, copper, strontium and iron on hypo-eutectic Al-Si-Cu and Al-Si-Mg cast alloys used in cylinder heads. El Sevier. 2016.

- [10] Liu Maowen, Hui Fu, Lixi Tian, Xiao Wenlong, Qiuming Peng, Chaoli Ma. Mecanismos de nucleación y crecimiento de nano-escala de Si precipita en Al-7Si en solución sólida sobresaturada. El Sevier. 2017.
- [11] Yuan Xing, Jia Zhihong, Jiehua Li do , Lipeng Ding, Huilan Huang, Liu Qing .Microestructura y propiedades mecánicas de fundición de aleación de Al-Si-Cu-Hf. El Sevier. 2010.
- [12] World Aluminium (Aluminium and the automotive). D. R. Askeland, "Ciencia e Ingeniería de los Materiales", 3ª Edición, International, Thompson Editores, (1998), pp.195-200.
- [13] M. Faraji, L. Katgerman. The effect of heat treatment on the microstructure and, hardness of A356 aluminum alloy. Aluminum alloys: fabrication, characterization and applications. TMS, 2008.
- [14] Standard Practice for Compression Tests of Metallic Materials at Elevated Temperatures with Conventional or Rapid Heating Rates and Strain Rates. 2018.
- [15] K. G. Basavakumar, P. G. Mukunda\*, M. Chakraborty. Influence of refinement and modification on dry sliding wear behaviour of Al-7Si and Al-7Si-2.5Cu cast alloys. Journal of Processing Technology 186(2007) 236-245.
- [16] I. J. Polmear, Recent Developments in Light Alloys. Emeritus professor, Department of Materials Engineering, Monash University, Clayton, Victoria 31168, Australia. 1996.
- [17] Sachin Kumar Rathia, Ashok Sharma, Marisa Di Sabatino. Effect of mould temperature, grain refinement and modification on hot tearing test in Al-7Si-3Cu alloy. Department of Metallurgical and Materials Engineering, Malaviya National Institute of Technology Jaipur, Jaipur (2017), India. Department of Materials Science and Engineering, Norwegian University Science and Technology, 7491 Trondheim, Norway.
- [18] M.A. Talamantes-Silva, A. Rodríguez, J. Talamantes-Silva, S. Valtierra, Rafael Colás. Characterization of an Al-Cu cast alloy. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, A.P. 149-F, 66451 San Nicolás de los Garza, N.L., México. Nemark, S.A. de C.V., Libramiento Arco Vial km 3.8, 66221 García, N.L., México. 2008.
- [19] A.M.A. Mohamed, F.H. Samuel, S. Al, Materials Science & Engineering A Microstructure, tensile properties and fracture behavior of high temperature Al-Si-Mg-Cu cast alloys, Mater. Sci. Eng. A. 577 (2013) 64–72. doi:10.1016/j.msea. (2013).03.084.

- [20] H.A. Elhadari a, H.A. Patel a, D.L. Chena, W. Kasprzak. Tensile and fatigue properties of a cast aluminum alloy with Ti, Zr and V additions. Department of Mechanical and Industrial Engineering, Ryerson University, 350 Victoria Street, Toronto, ON M5B 2K3, Canada b CANMET-Materials Technology Laboratory, Natural Resources Canada, 183 Longwood South Street, Hamilton, ON L8P 0A1, Canada. 2020.
- [21] Fathi Habashi..Handbook of extractive metallurgy II, Université, Laval, Département de mines et de Métallurgie, Québec G1K /P4. Canada. 1997.
- [22] PSA – Ford, les Diesel de la phase 4. Innovations & Technologies, Ingénieurs de l'Automobile, N°779, pp 18 – 19. 2017.
- [23] Ramon, Lamas Martinez, Comportamiento microestructural y mecánico de las aleaciones Al-5Cu y Al-7Si aplicadas en cabezales de cilindro en motores a diésel., Tesis de Maestría, 2018.
- [24] Carla, Salazar Briseño, Efecto del Ni en el comportamiento mecánico a temperatura ambiente y alta temperatura de aleaciones Al-5Cu-xNi y Al-10Si-3Cu-xNi con adiciones de 0.22Ti, 0.2V y 0.15Zr., Tesis de maestría, 2020.
- [25 ] S.G. Shabestari, H. Moemeni, Effect of copper and solidification conditions on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys, J. Mater. Process. Technol. 153–154 (2004) 193–198. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.302.
- [26] Intelágeo Roque, Bonato Alberto. Fundición y Moldeo. Taller II Masterización: recursos pedagógicos. Dpto. Formación Tecnológica. Cod. 9201-19. 2019.
- [27] García Caballero, R. (1970). Guía Tecnológica de Fundición.
- [28] George E. Dieter, “Mechanical Behavior under Tensile and Compressive Loads”, “ASM Handbook Vol. 8: Mechanical Testing and Evaluation”, ASM Internacional. 2000.
- [29] S.K Shuhu, F Czerwinski, W Kasprzak. J. Friedman. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of cast Al-Si-Cu-Mg alloy with micro additions of Zr-Ti-V. DI Chen Department of Mechanical and Industrial Engineering, Ryerson University, 350 Victoria Street, Toronto, Ontario M5B 2K3, Canada (Corresponding author sshata@ryerson.ca) CanmetMATERIALS, Natural Resources Canada 183 Longwood Road South, Hamilton, Ontario L8P 0A1 Canada. 2015.

- [30] ©Oxford Instruments 2021, website by Miramar Communications Ltd. 2021.
- [31] S. Manasijevic, R. Radisa, S. Markovic, Z. Acimovic-pavlovic, K. Raic, Thermal analysis and microscopic characterization of the piston alloy, *Intermetallics*. 19 (2011) 486–492. doi:10.1016/j.intermet.2010.11.011.
- [32] John R. Brown. *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*. 11ed. Butterworth Heinemann. 1999 (296Pag).
- [33] José Antonio Ordaz Sanz, María del Carmen Melgar Hiraldo, Carmen María Rubio Castaño. *Métodos estadísticos y econométricos en la empresa y para finanzas*. Departamento de Economía, Métodos Cuantitativos e Historia Económica, Universidad Pablo de Olavide. ISBN: 978-84-694-7251-4. 2010
- [34] Viviana S. de Lozano, María Julia Yañes, Alfonsina Morales. *Principios y Practica de la microscopía electrónica*. Bahía Blanca: Viviana Sorrivias de Lozano, 2014. E-book.
- [35] Maria Esther escudero Maquero, *Introducción a las técnicas de análisis por chispa-OES y XRF*, Laboratorio análisis químico, CENIM(CSIC) Madrid, Noviembre 2016.
- [36] Edited by S. Amelinckx. D. va Dyck, J. van Landuyt, G, va Tendeloo. *Electron Microscopy Principles and Fundamenstals*. S. *Handbook of Microscopy, Applications in Materials Science, Solid-State Physics and Chemistry*. 1997.
- [37] Patrick Echlin. *Handbook ok sample Preparation for Scannin Elecctron Microscopy and X-ray Microanalysis*. Cambridge Analytical Mocroscopy, UK. Springer. 2009
- [37] Gutiérrez, A. (2007). "Acero & Hierro." from <http://www.monografias.com/>
- [38] A. Biedermann, L. M. H.(1957). *Tratado Moderno de Fundición del Hierro y del acero*.
- [39] [https://www.wikiwand.com/es/Culata\\_\(motor\)](https://www.wikiwand.com/es/Culata_(motor)), 2021
- [40] <https://www.actualidadmotor.com/la-culata-del-motor/>, 2021.

- [41] Mercedes Yolanda Rafael Morales, Andrés Hernández Guzmán, Caracterización de un motor de combustión interna con dos tipos de combustible, ISSN 0188-7297, Publicación Técnica No. 417, Sanfandila, Qro, 2014.
- [42] Alu-stock s. a., El libro del aluminio 5, informacion-tecnica, Industria o arquitectura, Published on Jan 11, 2013.
- [43] Aluminium Handbook. 2 Forming, Casting, Surface Tratment, Recycling and Ecology. First Edition. 2004, Aluminium-Verlang. P.403.
- [44] <https://www.ibertest.es/products/ensayo-de-compresion/>
- [45] <https://multion.com/producto/design-expert>