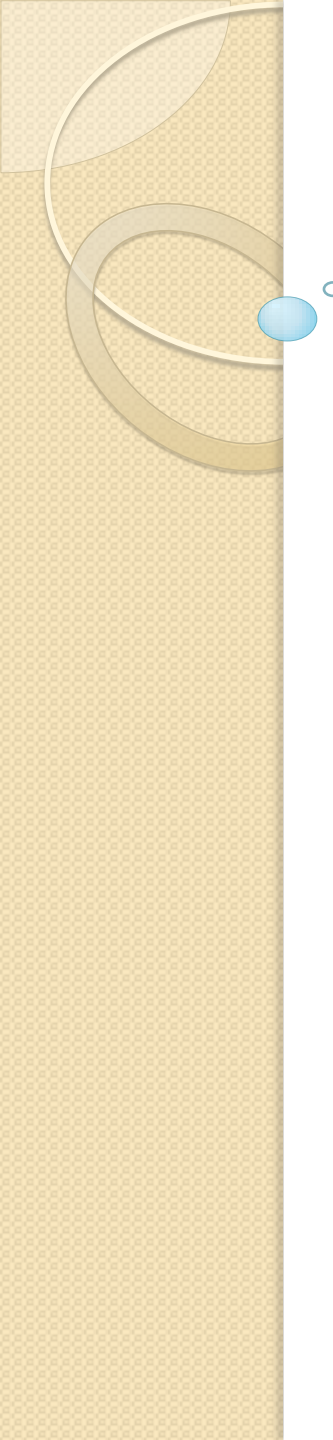




CARACTERIZACIÓN MECANICA Y ELÉCTRICA DE LA ALEACION DE ALUMINIO 6201 DE USO EN LA FABRICACION DE CABLES ELÉCTRICOS

Diego Fernando Bonilla Lemus

Programa de Ingeniería de Materiales
Facultad de Ingeniería

Directora:
Maribel Amu Bolaños

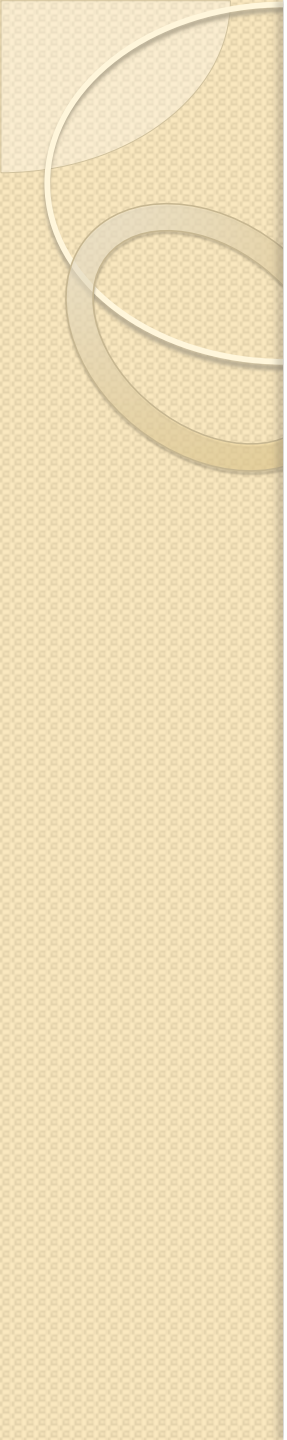


Tabla de contenido

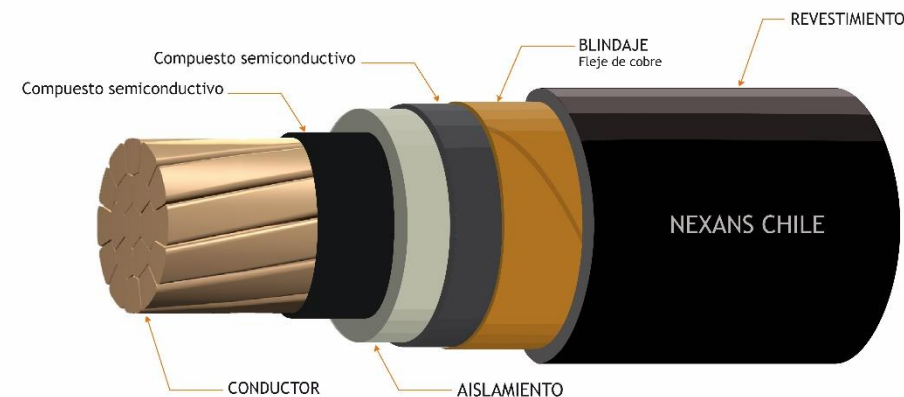
- Introducción
- Objetivos
- Metodología
- Análisis de Resultados
- Conclusiones
- Bibliografía

Introducción

Material conductor	Conductividad (%IACS)	Resistencia a la tensión (Mpa)	Densidad (g/cm³)
Cobre	100	220	8,89
Aleación de Hierro-Cobre	70	700	8,89
Aluminio (Serie 6xxx)	52	295	2,69
Compuestos (Aluminio + Carbono)	54	314	2,85
Aluminio (Aleación 1350)	61	152	2,71

Ventajas del Aluminio vs Cobre

- Aumentos en las resistencias de mas del 10%
- 40% menos en peso de estructuras de aluminio
- Reducción de costos



Cable conductor eléctrico submarino

Introducción

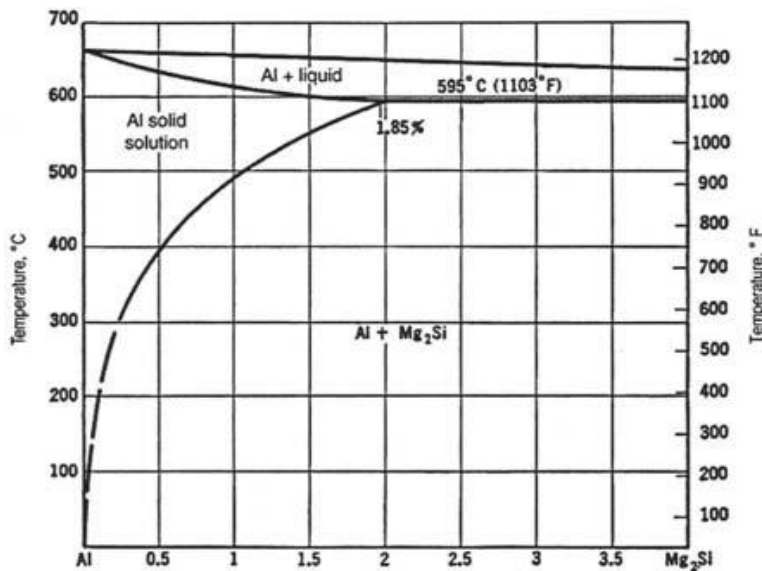
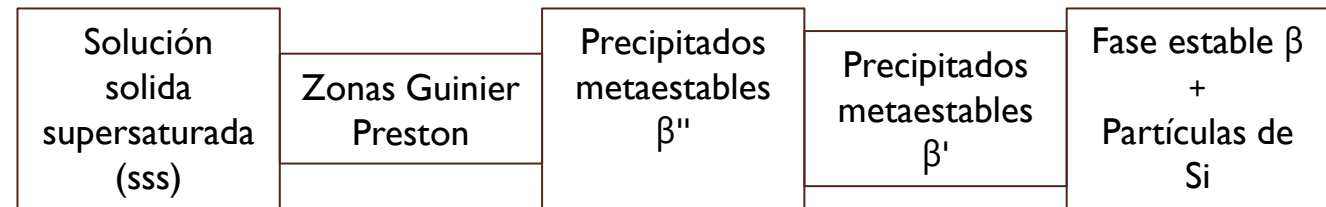


Diagrama de fase aleaciones de aluminio serie 6xxx

Composición Química %

Elemen.	Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	B	Otros elem.	Al
AA6101	0.1	0.5	0.3-0.7	0.03	0.35-0.8	0.1	0.03	0.06	0.1	Resto
AA6201	0.1	0.5	0.5-0.9	0.03	0.6-0.9	0.1	0.03	0.06	0.1	Resto



Secuencia de precipitación durante el envejecimiento.

Aleación de Aluminio	Resistencia a la tracción [Mpa]	Conductividad [(%) IACS]	Resistividad [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]
6101	170	55	0.031
6201	175	52.5	0.033

- C. Bunte; L. Zamboni; M. Glassel; D. Zalcman(2007). DESARROLLO DE ALEACIONES DE ALUMINIO PARA APLICACIONES EN LA INDUSTRIA ELÉCTRICA. SAM/CONAMET.
- A.K. Gupta, D.J. Lloyd , S.A. Court. Precipitation hardening in Al-Mg-Si alloys with and without excess Si. Materials Science and Engineering A316 (2001) 11-17
- ASTM B398/B398M - 15
- ASTM B317/B317M - 07

Objetivos

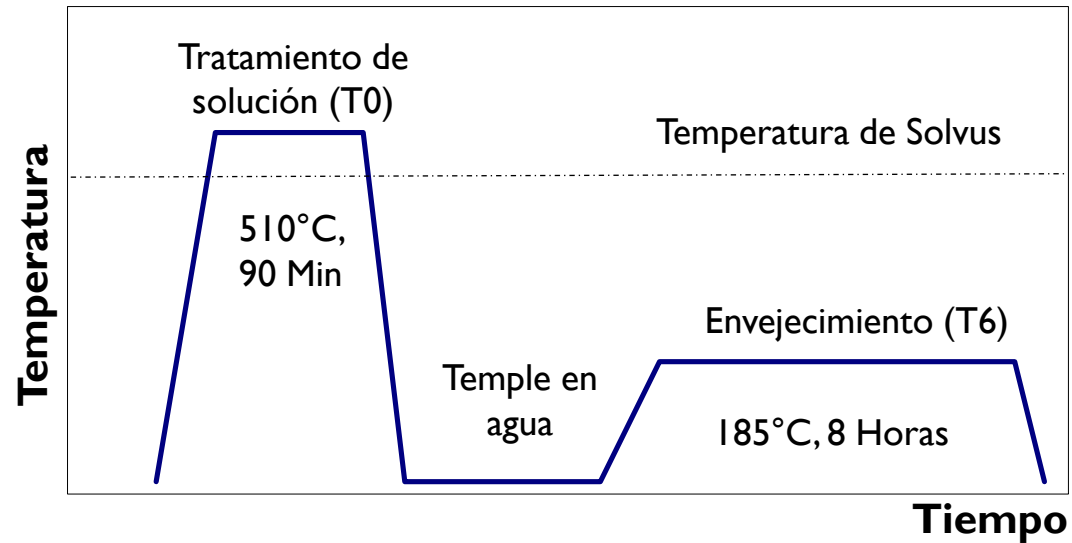
❑ **Objetivo general**

- Investigar el efecto del tratamiento térmico de envejecimiento sobre las propiedades mecánicas y eléctricas de la AA6201.

❑ **Objetivos específicos**

- Evaluar el efecto del tratamiento térmico de envejecimiento sobre las propiedades mecánicas de la Aleación de Aluminio 6201.
- Determinar la resistividad eléctrica de la Aleación de Aluminio 6201 en todos los estados de envejecimiento en estudio.
- Determinar los cambios en la secuencia de precipitación a través de ensayos de DSC.

Metodología



Esquema de tratamiento térmico

- **D.C.A**
- **Factor:** Tratamiento térmico
- **Niveles:**
 - T0 (estado de solución)
 - T4 (estado de suministro)
 - T6 (estado de envejecimiento)
- **Variables de respuesta:**
 - Comportamiento a la tensión
 - Microdureza
 - Resistividad eléctrica

Tabla de repeticiones			
Tratamiento térmico	Microdureza	Resistividad eléctrica	Comportamiento a la tensión
T0	8	2	4
T4	8	2	4
T6	8	2	4

Metodología

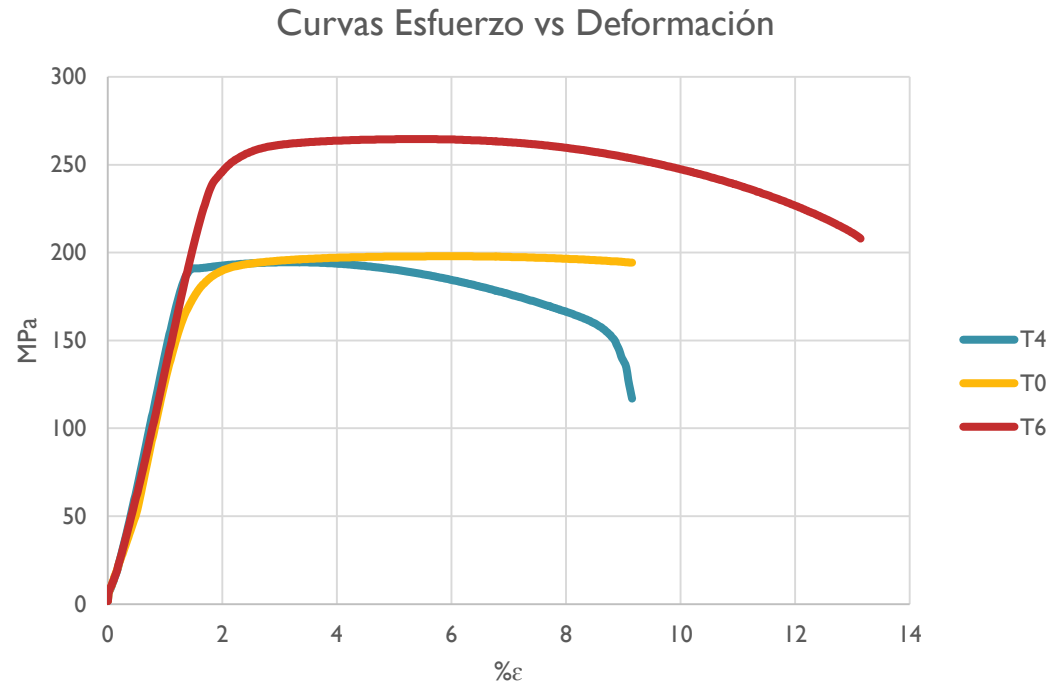
- Ensayo de Microdureza
 - Evaluar la evolución de la microdureza como una función de la condición del tratamiento térmico de la Aleación en estudio según la norma ASTM E384.
- Ensayo de tensión
 - Evaluar la resistencia a la tensión de las Aleaciones de Aluminio según lo establecido en la norma ASTM B 557M – 02.
- Resistividad eléctrica
 - Determinar la resistividad eléctrica de la aleación de aluminio en estudio para cada estado de envejecimiento.

Metodología

- Calorimetría Diferencial de Barrido
 - Determinar la secuencia de precipitación de la aleación a partir de muestra en estado T0
- Caracterización de la falla en ensayo de tensión
 - Determinar el tipo de falla presentada durante el ensayo de tensión y comportamiento dúctil o frágil por medio de micrografías SEM.

Análisis de Resultados

- Ensayos de Tensión



Estado de Envejecimiento	Esfuerzo Máximo (Mpa)	%ε
T0	181,86	6,295
T4	182,67	17,49
T6	204,4	11,51

Análisis de Resultados

- Ensayos de Tensión

Estado de Envejecimiento	Esfuerzo Máximo (Mpa)	% ϵ
<u>T0</u>	<u>181,86</u>	<u>6,295</u>
T4	182,67	17,49
T6	204,4	11,51



Análisis de Resultados

- Ensayos de Tensión

Estado de Envejecimiento	Esfuerzo Máximo (Mpa)	% ϵ
T0	181,86	6,295
<u>T4</u>	<u>182,67</u>	<u>17,49</u>
T6	204,4	11,51



Análisis de Resultados

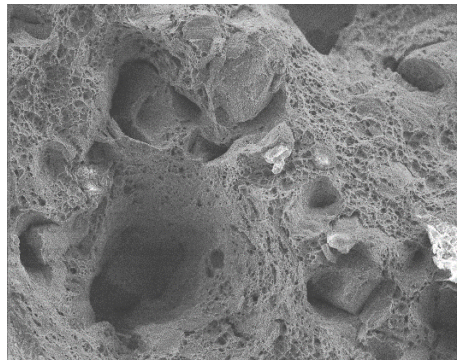
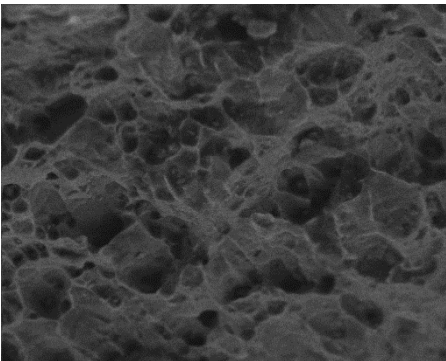
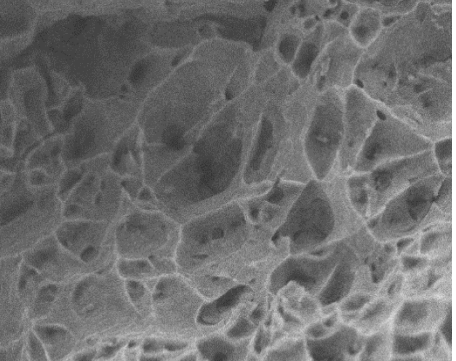
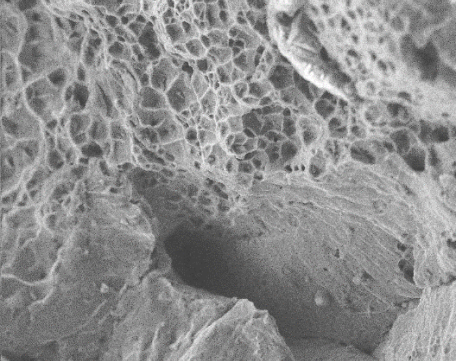
- Ensayos de Tensión

Estado de Envejecimiento	Esfuerzo Máximo (Mpa)	% ϵ
T0	181,86	6,295
T4	182,67	17,49
<u>T6</u>	<u>204,4</u>	<u>11,51</u>



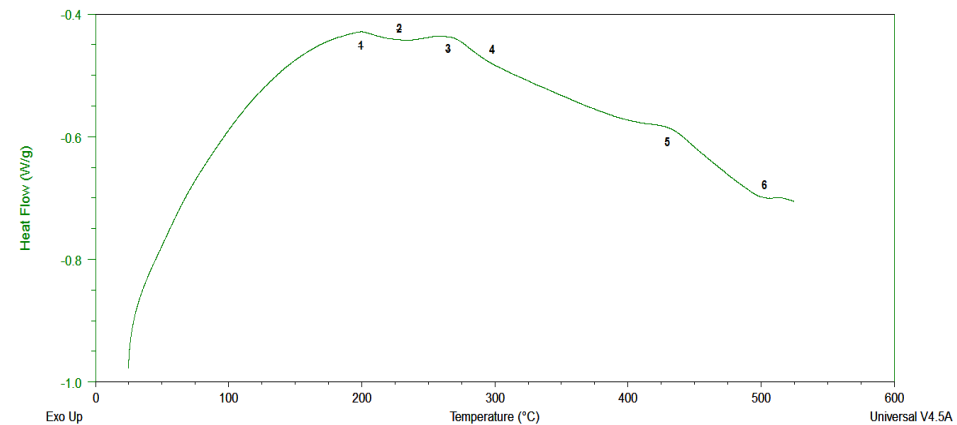
Análisis de Resultados

- Micrografías de fallas en ensayo de tensión

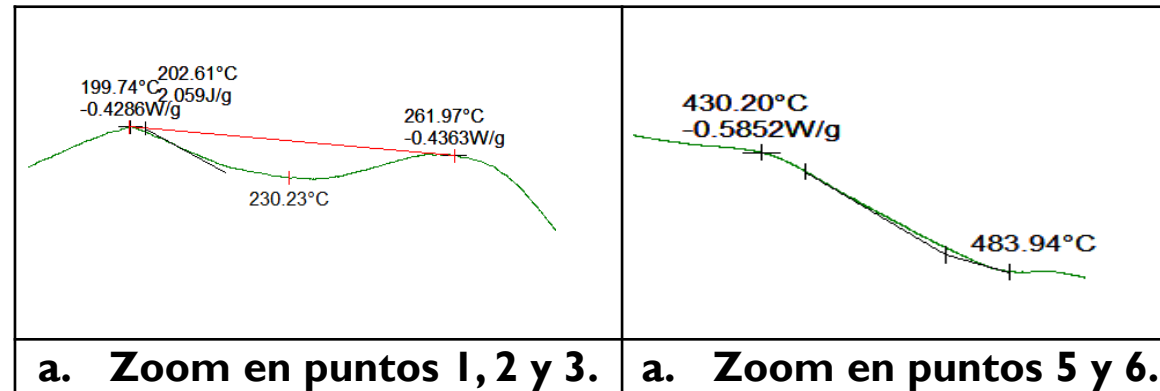
T0	T4	T6
		
300 aumentos	110 aumentos	270 aumentos
		
1700 aumentos	2000 aumentos	1000 aumentos

Análisis de Resultado

- Ensayos de Calorimetría Diferencial de Barrido

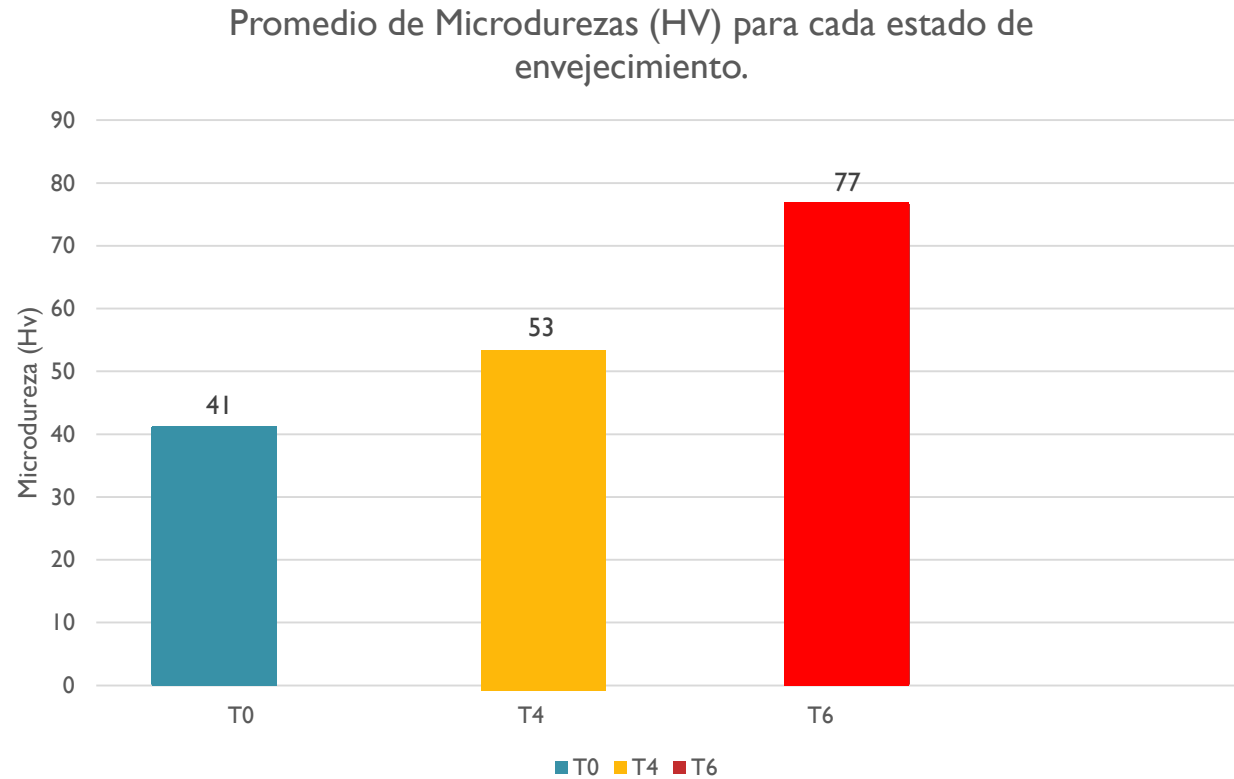


Curva DSC para muestra en estado T0



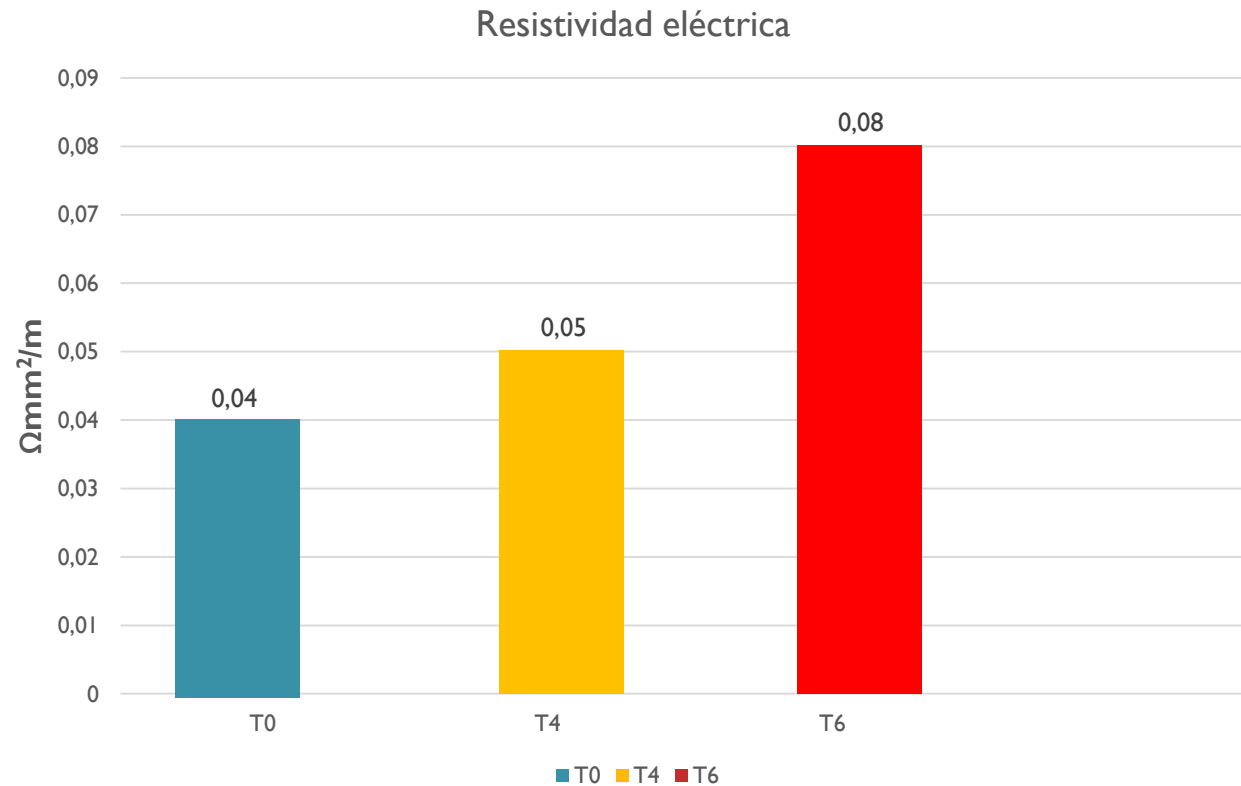
Análisis de Resultado

- Ensayos de Microdureza



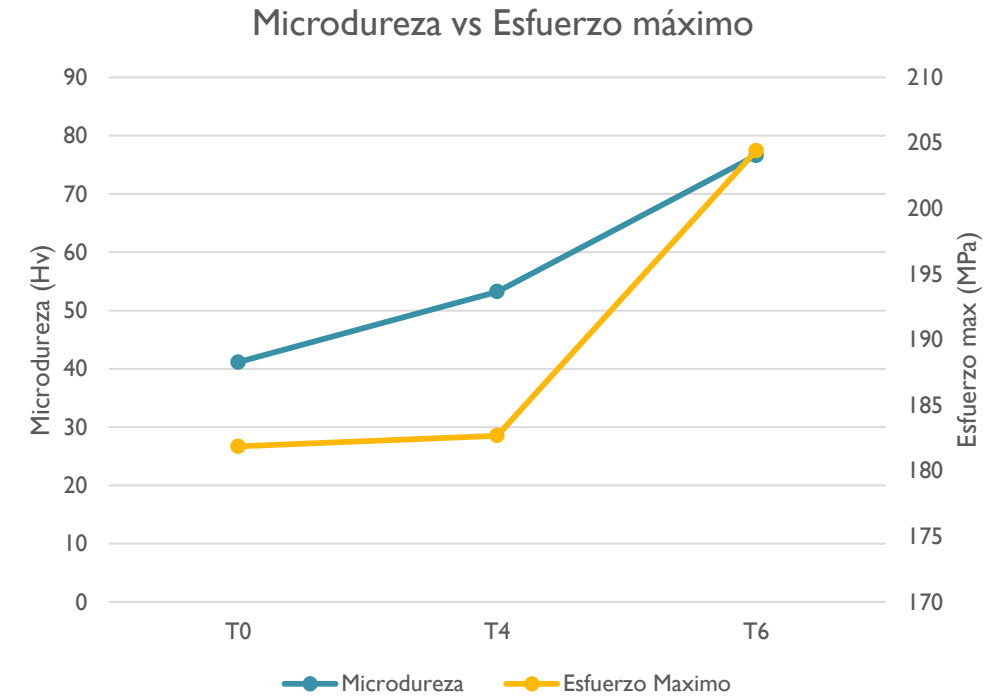
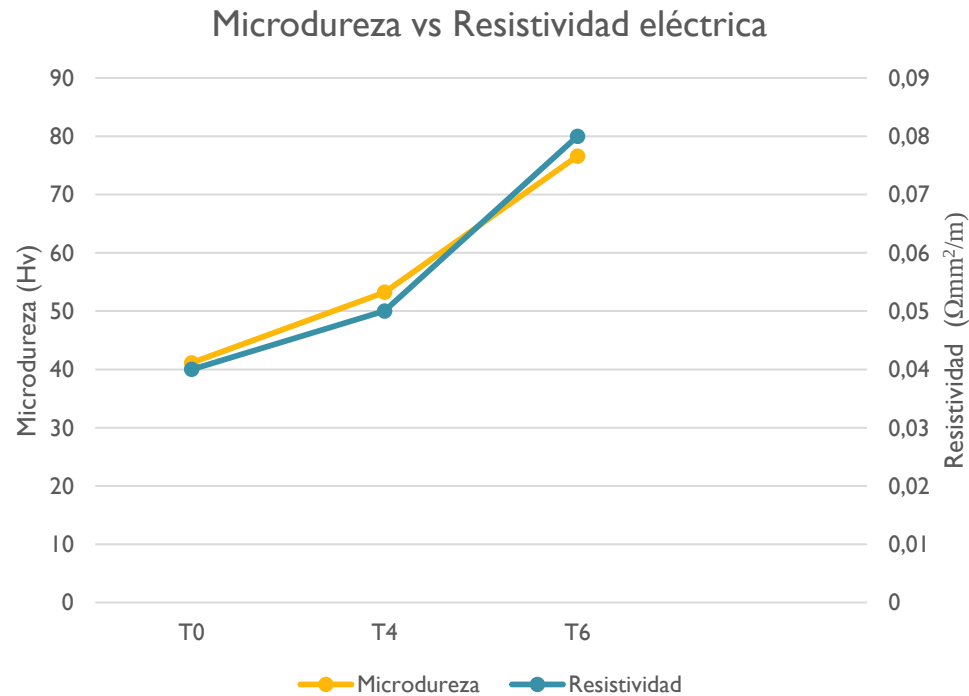
Análisis de Resultado

- Ensayos de Resistividad Eléctrica



Análisis de Resultado

- Comparacion de la Microdureza, Resistividad Electrica y Esfuerzo Maximo



Conclusiones

- Se pudo determinar que en el tratamiento térmico de solución T0 se produce una solución sólida sobresaturada de átomos de Magnesio y Silicio donde, se arrojaron las más bajas propiedades mecánicas y resistividad eléctrica en comparación con los otros estados de envejecimiento. Los ensayos mecánicos realizados permitieron corroborar que la condición de tratamiento térmico T6 de la Aleación de Aluminio 6201 exhibe las mejores propiedades mecánicas y resistividad eléctrica. Los resultados obtenidos para la condición de tratamiento térmico T4 corresponden a la resistividad eléctrica y propiedades mecánicas intermedias entre los estados T0 y T6 producto de un endurecimiento por formación obtenidos de la solución sólida sobresaturada.

Conclusiones

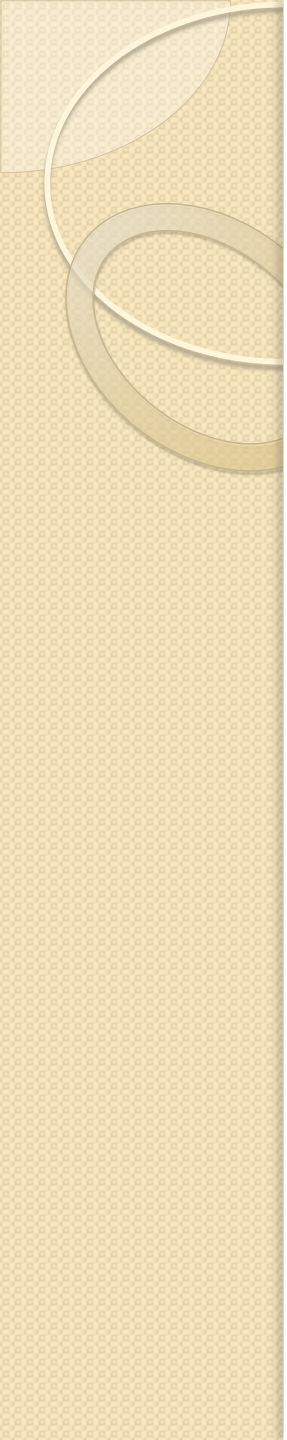
- Los resultados obtenidos de los ensayos de resistividad indicaron una fuerte influencia de los cambios microestructurales generados durante los tratamientos térmicos, en la que la precipitación de partículas en la matriz y sus diferentes formas y tamaños generan una dispersión de los electrones aumentando su resistividad y disminuyendo su conductividad.
- Para el análisis de los ensayos de DSC, se concluye que el material presente una secuencia básica de precipitación de una aleación de aluminio de la serie 6xxx donde la transición entre precipitados se da por disolución de clusters y el crecimiento y nucleación de precipitados endurecedores.

Referencias

- A.K. Gupta, D.J. Lloyd, S.A. Court (2000). Precipitation hardening in Al–Mg–Si alloys with and without excess Si. Elsevier.
- Angel Calvo (2003). Los cables submarinos: una rama emergente de la ingeniería civil en el siglo XIX. QUADERNS D'HISTÒRIA DE L'ENGINYERIA.
- Askeland, D.R.; Phulé, P.P. (2004). Ciencia e ingeniería de materiales. Editorial Thomson.
- Asm Handbook (1990). Volumen 2 Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special –Purpose Materials. ASM INTERNATIONAL.
- C. Bunte; L. Zamboni; M. Glassel; D. Zalcman (2007). DESARROLLO DE ALEACIONES DE ALUMINIO PARA APLICACIONES EN LA INDUSTRIA ELÉCTRICA. SAM/CONAMET.
- C. Ravi a,b,*; C. Wolverton b. First-principles study of crystal structure and stability of Al–Mg–Si–(Cu) precipitates. Acta Materialia 52 (2004) 4213–4227.
- C.D. Marioara, H. Nordmark, S. J. Andersen, R. Holmestad (2006). Post-β" phases and their influence on microstructure and hardness in 6xxx Al–Mg–Si alloys. Journal of material science.
- Cabibbo M., Evangelista E., Vedani M. (2005). Influence of severe plastic deformation on secondary phase precipitation in a 6082 Al–Mg–Si alloy. Metallurgical and Materials transactions.
- Di Tie, Ren-guo Guan, Ning Guo, Zhouyang Zhao, Ning Su, Jing Li and Yang Zhang. Effects of Different Heat Treatment on Microstructure, Mechanical and Conductive Properties of Continuous Rheo-Extruded Al–0.9Si–0.6Mg (wt%) Alloy.
- Foog, D.; Dobson, A.; Deighton, A. (2012). Aluminum cable conductor eases water depth restrictions.
- Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales
- G. A. EDWARDS, K. STILLER, G. L. DUNLOP and M. J. COUPER (1998). The precipitation sequence in Al–Mg–Si sequence. Pergamon.
- G. K. Triantafyllidis, I. Kiligaris, D. I. Zagkliveris, I. Orfanou, S. Spyridopoulou, E. Mitoudi-Vagourdi, S. Semertzidou. Characterization of the A6060 Al Alloy Mainly by Using the Micro-Hardness Vickers Test in Order to Optimize the Industrial Solutionizing Conditions of the As-Cast Billets. Materials Sciences and Applications (2015) 6, 86–94.
- Gaoyong Lin, Zongpeng Zhang, Hongyang Wang, Ke Zhou and Yuyong Wei, Enhanced strength and electrical conductivity of Al–Mg–Si alloy by thermo-mechanical treatment, Materials Science & Engineering A, <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.050>
- George Y. Liu (2009). Effect of ageing heat treatment on the hardness and tensile properties of Aluminum A356.2 casting alloy.
- Grazyna Mrówka-Nowotnik, Jan Sieniawski. Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys. Journal of Materials Processing Technology 162–163 (2005) 367–372
- Holmestad, R.; Bjorge, R.; Flemming, J.H.E.; Malin, T.; Calin, D.M.; Sigmund, J.A. (2011). Characterization and structure of precipitates in 6xxx. Aluminium Alloys.
- J. Banhart, M.D.H. Lay, C.S.T. Chang, A.J. Hill (2015). The kinetics of natural ageing in Al–Mg–Si alloys studied by positron annihilation lifetime spectroscopy.

Referencias

- M.R.W.S Abdala, J.C. García de Blas, C. Barbosa, O. Acsehrad. Thermoelectrical power analysis of precipitation in 6013 aluminum alloy. *Materials Characterization* 59 (2008) 271 – 277.
- Mitsunaki Furui, Tomoyuki Kitamura, Tatsuya Ishikawa, Susumu Ikeno, Seiji Saikawa and Nobuyuki Sakai. Evaluation of Age Hardening Behavior Using Composite Rule and Microstructure Observation in Al-Si-Mg Alloy Castings. *Materials Transactions*, Vol. 52, No. 6 (2011) pp. 1163 to 1167.
- O. R. MYHRI, Ø GRONG and S. J. ANDERSEN (2000). *MODELLING OF THE AGE HARDENING BEHAVIOUR OF Al-Mg-Si ALLOYS*. Elsevier Science Ltd.
- Porter, Easterling.(1988). *Phase transformations in metals and alloys*. Van Nostrand Reinhold.
- R.A.Mueller. Relationships among the metallurgical condition, hardness, and the electrical conductivity of aluminum alloys. *Masters Theses* 1967.
- S. Esmaili, D.J. Lloyd, W.J. Poole. Effect of natural aging on the resistivity evolution during artificial aging of the aluminum alloy AA6111. *Materials Letters* 59 (2005) 575–577
- S. Ortolá. *Manual del Aluminio y sus Aleaciones* (2009).
- S. P. Ringer and K. Hono. Microstructural Evolution and Age Hardening in Aluminium Alloys: Atom Probe Field-Ion Microscopy and Transmission Electron Microscopy Studies. *MATERIALS CHARACTERIZATION* 44:101–131 (2000)
- S. Pogatscher, H. Antrekowitsch, H. Leitner, T. Ebner, P.J. Uggowitzer. Mechanisms controlling the artificial aging of Al-Mg-Si Alloys. *Acta Materialia* 59 (2011) 3352-3363.
- S. SURIÑACH, M. D. BARO, S. BORDAS, N. CLAVAGUERA, M. T. CLAVAGUERA-MORA (1992). La calorimetría diferencial de barrido y su aplicación a la Ciencia de Materiales.
- Sedat Karabay (2006). Modification of AA-6201 alloy for manufacturing of high conductivity and extra high conductivity wires with property of high tensile stress after artificial aging heat treatment for all-aluminium alloy conductors – ELSEVIER.
- Shahrzad Esmaili, David J. Lloyd. Characterization of the evolution of the volume fraction of precipitates in aged AlMgSiCu alloys using DSC technique. *Materials Characterization* 55 (2005) 307 – 319.
- Smith, W. F; Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* Quinta edición. MC GRAW HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A DE C.V.
- Suttawan Imurai, Julatep Kajornchaiyakul, Chachana Thanachayanont, John T.H. Pearce and Torranin Chairuangsrri. Age Hardening and Precipitation Behavior of an Experimental Cast Al-Mg-Si Alloy Treated by T6 and T616 Heat Treatments. *Chiang Mai J. Sci.* 2010; 37(2) : 269-281
- W.F. Miao and D.E. Laughlin. PRECIPITATION HARDENING IN ALUMINUM ALLOY 6022. *Scripta Materialia*, Vol. 40, No. 7, pp. 873–878, 1999
- W. H. Hunt, Jr., R. C. Stiffler, J. Green. The Use Of Electrical Conductivity Measurements For Heat Treatable Aluminum Alloys. *Heat Treating: Proceedings Of The 18th Conference*. 1998
- Wuhua Yuan, Zhenyu Liang (2011); Effect of Zr addition on properties of Al-Mg-Si aluminum alloy used for all aluminum alloy conductor. *Materials and Design*.
- Z Pakiel, K Ludwichowska, J Ferenc and M Kulczyk (2014). Mechanical properties and electrical conductivity of Al 6101 and 6201 alloys processed by hydro-extrusion – IOPscience.



**GRACIAS POR LA
ATENCIÓN
PRESTADA**