

DESARROLLO, FABRICACIÓN Y EVALUACIÓN DE ALAMBRE DE ALEACIÓN AA2319 PARA APORTE EN SOLDADURAS DE PIEZAS AEROESPACIALES

Lacoste, Juan (*) – Ruíz Díaz, Fernando – Feloy, Lucas – Cozzarín, Ana Laura - Tovio, Daniel – Maffía, Ernesto.

(*)juan.lacoste@ing.unlp.edu.ar

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP)

Departamento de Mecánica – UIDET ProInTec I&D

Calle 1 y 47, Tel: 423 – 6677/8 Interno 185

La Plata, Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

En aplicaciones estructurales de uso aeroespacial son utilizadas diferentes aleaciones de aluminio de alta resistencia entre las que se encuentran las de la serie 2XXX (Al-Cu), 7XXX (Al-Zn) y Al-Li. Estas estructuras se unen mediante diversas técnicas de soldadura y es por ello que en el ProInTec I&D se llevan adelante estudios de los distintos procesos que generan las uniones, con y sin fusión. Una de las aleaciones más reconocidas en esta industria es la AA2219, para la cual, en procesos de fabricación que requieren soldadura con fusión se utiliza como material de aporte a la aleación AA2319. Uno de los métodos tradicionales para llevar a cabo el proceso de soldadura es el método TIG, y el insumo utilizado como aporte consiste en una varilla de alambre de AA2319. Cabe destacar que en Argentina no sólo no se produce este insumo, sino que ni siquiera se desarrolla la aleación, situación que ha motivado el establecimiento de un objetivo asociado a la mitigación de esta carencia. A partir de esta situación y en pos de contribuir a un desarrollo tecnológico y espacial que permita ubicar al país en la senda que concluye en un estado soberano en esta materia, desde el grupo ProInTec I&D se han realizado los estudios y prácticas necesarias para llevar a cabo el desarrollo de la aleación AA2319, su procesado y establecimiento de parámetros termomecánicos para la fabricación del alambre para aporte de soldadura de aleación AA2219. Una vez completados tales estudios y obtenido el alambre de AA2319 se han establecido sus propiedades mecánicas, microestructurales y evaluado de manera directa comparando con insumos análogos de procedencia importada utilizados actualmente, en pos de establecer las cualidades y aptitud del alambre de origen nacional. Finalmente se efectuaron pruebas de soldadura y caracterización del cordón sobre placas de AA2219, obteniéndose valores de microdureza cercanos al 85% del material base y una tensión máxima de tracción promedio de 270 MPa. Los resultados obtenidos han expuesto una condición muy similar entre el material de origen nacional y el importado, sustentando sin dudas, la certeza en términos termomecánicos del desarrollo planteado para la aleación y fabricación de alambre de aporte por parte del grupo ProInTec I&D, lo que se traduce en un fuerte impulso e incentivo para profundizar el desarrollo tecnológico-espacial sabiendo que se cuenta con las capacidades para avanzar en esta área de manera sostenida y soberana.

INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio de alta resistencia son ampliamente utilizadas en la fabricación de aeronaves, misiles y en la industria aeroespacial, como así también, en accesorios y tanques para líquidos combustibles y de oxígeno. La razón de este amplio uso radica en su alta resistencia específica (relación de resistencia mecánica a densidad), su resistencia a la corrosión y eficiencia de carga especialmente en diseños de compresión.

La aleación AA2219 provee un amplio rango de resistencias y una importante resistencia a la corrosión bajo tensión. Fue introducida originalmente por sus relevantes características a elevadas temperaturas y por su excelente soldabilidad y alta resistencia del cordón de soldadura. Cuando esta aleación es soldada utilizando material de aporte, el proceso se lleva a cabo con la adición de aleación AA2319, la cual no se produce actualmente en nuestro país y solo puede obtenerse como insumo importado ya procesado. Ambas aleaciones son muy similares, siendo la única diferencia entre ellas el porcentaje de Titanio.

La aleación AA2319, se produce en el exterior como alambre de soldadura de aluminio con un contenido elevado de cobre (5,8 – 6,8 %) y un nivel controlado de manganeso que brinda una tenaz resistencia a las fisuras de corrosión por tensión y un buen servicio a temperaturas muy elevadas. El alambre se desarrolló para su uso en aplicaciones tales como aeronaves cuando se requiere una gran fortaleza estructural. El mismo viene en carretes y tramos cortados tanto para soldaduras MIG, como para TIG.

METODOLOGÍA

Se ha planteado la obtención de la aleación AA2319 por fusión, llevando a cabo un análisis químico para corroborar la composición del material. Posteriormente se ha establecido una secuencia de estudio y aplicación de tratamientos térmicos (Homogeneizado, Recocido de ablandamiento, Recocido de recristalización) que permite desarrollar de manera óptima el procesamiento de la aleación.

Esto ha consistido en principio, obviando los tratamientos térmicos efectuados, en deformar plásticamente en caliente el material a partir del método de laminación. Acto seguido, la placa fue seccionada en barras de sección transversal cuadrada, obtenidas por el método de corte por chorro de agua.

Luego, las barras obtenidas fueron tratadas térmicamente, y sometidas a un proceso de deformación plástica en frío por trefilación hasta alcanzar un diámetro final de 2 mm, habiendo sido necesaria la aplicación de recocidos de intermedios para que el material fuese capaz de soportar el porcentaje de deformación requerido. Finalmente, disponiendo de alambre aleación AA2319 en condiciones similares a las del insumo análogo importado se procedió a efectuar pruebas comparativas entre ambos, estudiando sus propiedades mecánicas y microestructurales. Por último se realizaron pruebas de soldadura sobre chapas de aleación AA2219 analizando las características mecánicas y metalográficas del cordón de soldadura obtenido.

DESARROLLO

La primera etapa del desarrollo ha consistido en la fusión de la aleación, proceso que fue llevado a cabo íntegramente en instalaciones del ProInTec I&D. Algunos de los elementos aleantes utilizados para la obtención de la aleación fueron incorporados en estado puro (Cu, Zr y V) y otros en liga madre al 10 % como es el caso del Titanio y el Manganeso.

La fusión de la aleación se llevó a cabo en un horno crisolero a gas y la colada se realizó en un molde metálico, a partir del cual se obtuvo una placa de 120 mm de ancho, 360 mm de longitud y 25,5 mm de espesor aproximadamente.

Luego del procedimiento de colada, la placa fue expuesta a un análisis químico según el método de espectrometría por emisión óptica. De esta manera, se obtuvo el porcentaje de cada uno de los elementos químicos componentes de la aleación como se observa en la Tabla 1, contrastado con los porcentajes de aleante en la composición típica de la aleación AA2319.

Tabla 1: Composición química del material experimental respecto de la típica de la aleación AA2319.

Aleación	Cu	Mn	Ti	Zr	V
AA2319	5,8 – 6,8	0,2 – 0,4	0,1 – 0,2	0,1 – 0,25	0,05 – 0,15
Placa	6,58	0,258	0,1	0,15	0,04

Como se aprecia, la composición química de la placa obtenida se encuentra dentro de los límites establecidos por la composición química típica de la aleación AA2319 con excepción del Vanadio que se presenta levemente por debajo del porcentaje establecido.

A fin de establecer la condición de partida desde el punto de vista microestructural, antes de comenzar con su procesado termomecánico se generaron muestras metalográficas de la placa.

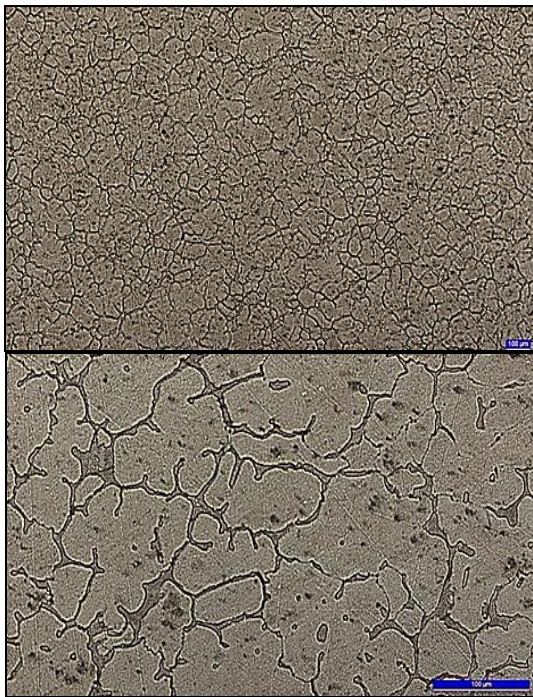


Figura 1: Aleación AA2319 en condición "como colada". Aumentos: Superior: 5x. Inferior: 20x.

Luego, se procedió a realizar un tratamiento térmico de homogeneizado durante 24 horas a una temperatura entre 500 y 550 °C, con el objetivo de disolver la fase presente en límites de grano y a su vez incorporarla en solución obteniéndose la microestructura que se muestra a continuación.

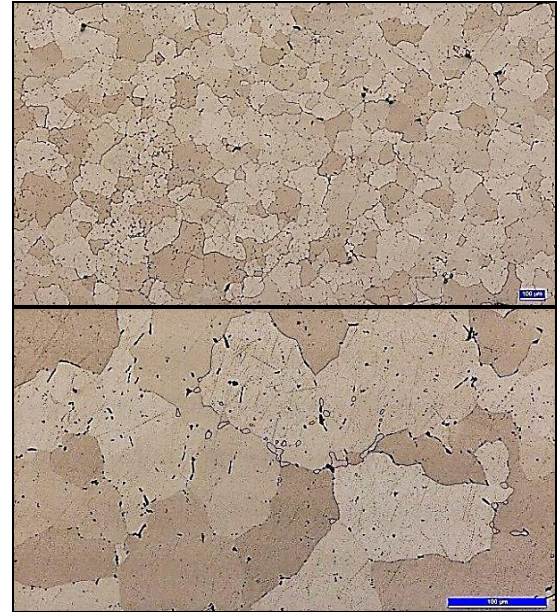


Figura 2: Aleación AA2319 en condición homogeneizada Aumentos: Superior: 5x. Inferior: 20x.

Una vez homogeneizado el material, la primera etapa ha consistido en un proceso de deformación plástica en caliente, más precisamente, laminación entre 500 y 550 °C, disponiendo del material en su condición de máxima solubilidad para facilitar el proceso de deformación plástica. Basados en experiencias previas, la placa fue laminada progresivamente hasta alcanzar un espesor final de 9,01 mm, valor que representa un porcentaje de deformación acumulada de 68,38%. Con el fin de exponer la condición microestructural resultante de este proceso se generaron metalografías de la sección transversal de la placa en la dirección de laminación.

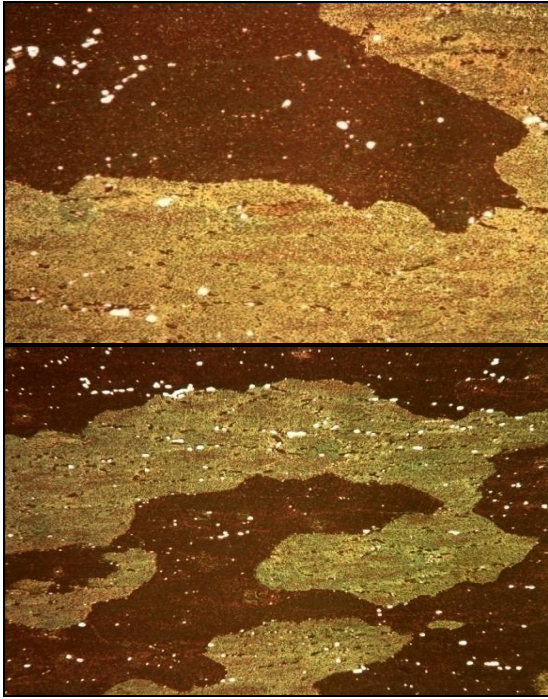


Figura 3: Aleación AA2319 en condición "como colada" laminada en caliente con un 68,3% de deformación acumulada. Aumentos: Superior: 5x. Inferior: 20x.

Luego, se fraccionó la placa en barras de sección transversal cuadrada de 9 mm de lado y 800 mm de longitud, para ser procesada por deformación plástica en frío. Esta decisión, se sustenta en la metodología de operación de los equipos utilizados para llevar a cabo el proceso de trefilación, a partir del cual se fabrica el alambre. El método de trabajo utilizado para la obtención de barras a partir de la placa laminada original fue el corte por chorro de agua.



Figura 4: Placa laminada en caliente, seccionada en barras por el método de corte por chorro de agua.

Para establecer una condición de partida susceptible de asimilar la deformación plástica en frío por trefilación se ha efectuado un tratamiento térmico de recocido de ablandamiento, cuyo objetivo consiste en establecer la condición de ductilidad del material en el mayor grado posible. Así, se obtiene una microestructura de precipitado grueso y espaciado, además del alivio de

tensiones generadas que puedan existir por deformaciones previas del material. Para alcanzar esta condición, se requiere exponer al material durante un periodo de 3 horas a 415 °C, seguido de un enfriamiento lento y controlado que debe ser inferior a 30 °C/h, hasta alcanzar una temperatura de 290 °C.

Como se dijo, el método de deformación plástica seleccionado ha sido el proceso de trefilado, el cual consiste simplemente en jalar y estirar el material a través de una matriz en forma de canal convergente, llamada trefila, mediante un esfuerzo de tracción aplicado del lado de salida. Así, el material resulta deformado por efecto de una compresión radial, producida por la reacción de la matriz sobre el material, más un estiramiento axial. Se lleva a cabo generalmente en frío, utilizando un número de pasadas o reducción a partir de matrices sucesivas. Este proceso brinda una excelente terminación superficial y tolerancias dimensionales.

La primera etapa de trefilado se realizó en sucesivas pasadas, hasta alcanzar el umbral de tolerancia a la deformación en frío del material. En función de esto, se decidió realizar un tratamiento térmico de recocido de recristalización con el objetivo de restituir la microestructura de la aleación a una condición capaz de continuar aceptando deformación plástica en frío. Para ello, se sometió al material a una temperatura de 415 °C durante 30 minutos con posterior enfriamiento al aire.

Esta metodología de trabajo se ha repetido sucesivamente, continuando con la deformación de manera progresiva y tratando térmicamente el material cada vez que llegaba a una condición umbral de deformación en frío, hasta alcanzar un diámetro de 2 mm, ya que el alambre de aleación AA2319 de origen importado que se disponía para pruebas comparativas contaba con esa dimensión.

Una vez obtenido el alambre de origen nacional, se ha decidido verificar sus propiedades mecánicas y contrastarlas con las correspondientes al homónimo importado. Para ello, se efectuaron ensayos de tracción, mediciones de microdureza Vickers y preparación de metalografías. Por último, a partir de la disponibilidad de chapas de aluminio AA2219 y en pos de evaluar el desempeño, se efectuaron

pruebas de soldadura con el alambre desarrollado en ProInTec I&D con el objetivo de caracterizar el cordón de soldadura resultante a partir de ensayos de tracción y mediciones de dureza.

El desarrollo planteado por ProInTec I&D para la obtención de alambre de aluminio AA2319, ha sometido al material como se describió oportunamente a una serie de procesos termomecánicos de influencia directa sobre sus aptitudes y propiedades. Si bien resulta importante el análisis e influencia de cada una de las actividades intervinientes desde la fusión del material hasta la obtención final del alambre, se hará hincapié especialmente en los resultados obtenidos a partir de la comparación del alambre de origen nacional y el importado y se evaluará el desempeño del producto fabricado. Por otro lado, se expondrán características mecánicas y metalográficas del cordón de soldadura obtenido con aporte de alambre AA2319 nacional sobre chapas de aluminio AA2219.

Una de las primeras actividades comparativas entre ambos materiales que se realizó, fue la medición de microdureza Vickers, obteniéndose en promedio los valores que se muestran a continuación.

Tabla 2: Valores de microdureza Vickers sobre ambos materiales.

Material	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio
Nacional	91,58	87,64	87,26	88,82
Importado	98,5	102,7	104,6	101,93

Los valores obtenidos muestran consistencia, ya que los expuestos surgen de un importante número de mediciones llevadas a cabo sobre cada uno de los alambres, siendo los indicados los más representativos.

Posteriormente, ambos alambres fueron sometidos a ensayos de tracción. En este caso, debido al reducido diámetro de los alambres, los ensayos se efectuaron con el fin único de evaluar y contrastar los valores máximos de resistencia de cada uno.

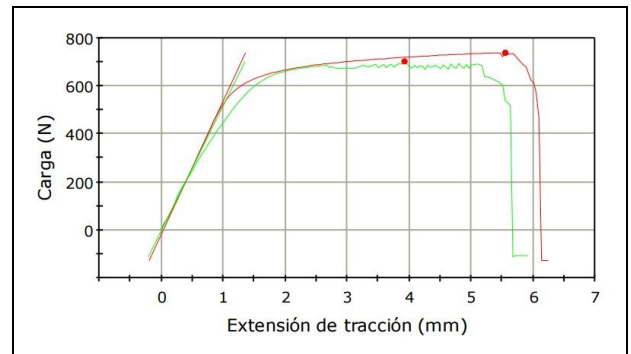


Figura 5: Curvas de tracción obtenidas para cada uno de los alambres. Alambre nacional (Verde) vs Alambre importado (Rojo).

Tabla 3: Valores de carga y tensión máxima de tracción para ambos alambres.

Curva	Área transversal [mm ²]	Carga máxima [N]	Tensión máxima [MPa]
Roja (Importado)	3,14	738	235
Verde (Nacional)	3,08	702	228

Se aprecia una cercanía notable entre los valores de tensión máxima soportada por cada uno de los alambres. Si bien en este caso se muestra solamente una curva de cada material, se han efectuado una importante cantidad de ensayos de tracción sobre cada uno, arrojando valores similares a los presentados.

Otro aspecto tenido en cuenta en el análisis ha sido la microestructura de cada uno de los materiales.

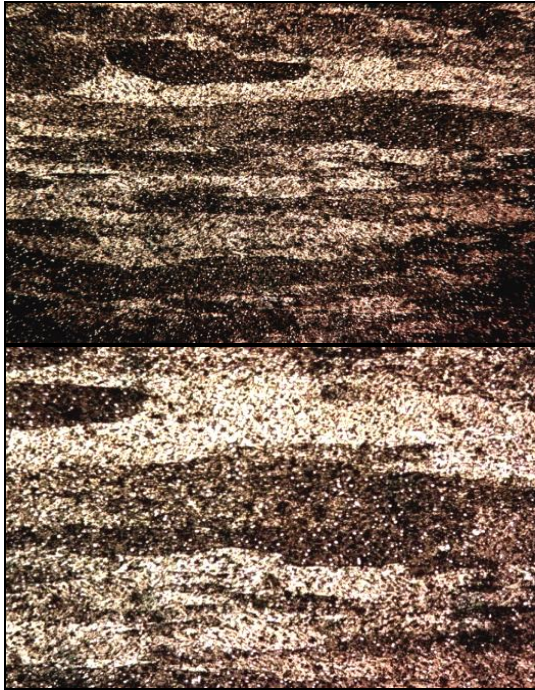


Figura 6: Microestructura correspondiente al alambre de origen importado. Aumentos: Arriba: 5x, Abajo: 20x.

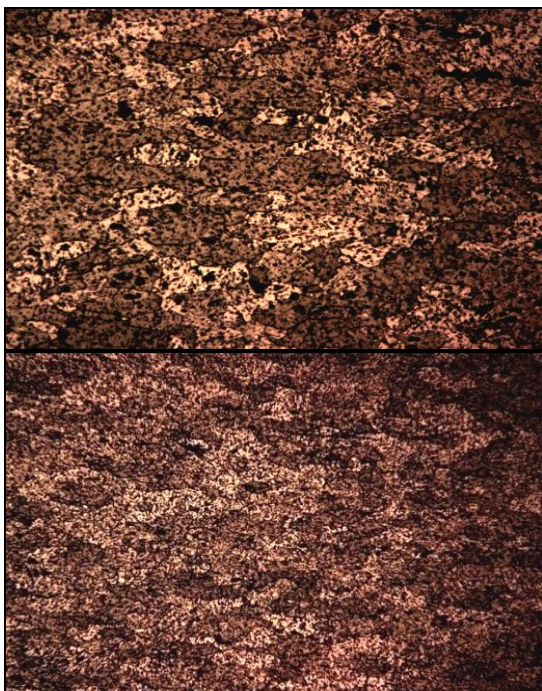


Figura 7: Microestructura correspondiente al alambre de origen nacional. Aumentos: Arriba: 5x, Abajo: 20x.

El alambre de origen importado presenta una microestructura con un grano claramente deformado y orientado en la dirección de trefilación, lo cual expone un grado de

deformación acumulada superior con respecto a la microestructura presentada por el alambre producido por ProInTec I&D. En el alambre nacional, puede notarse una microestructura de grano, aunque deformado, mucho más regular en su geometría que en el caso del alambre importado. Esta situación, se corresponde con la diferencia que se presenta en términos de los valores máximos de resistencia entre un material y otro.

Para finalizar, se ha caracterizado el cordón de soldadura resultante en chapas de aluminio AA2219 soldadas por el método TIG.

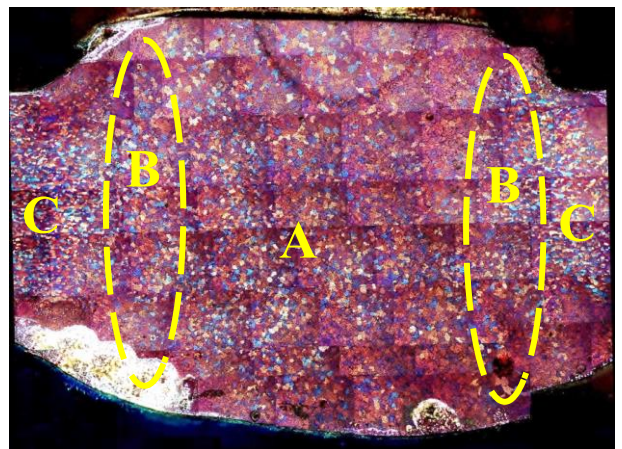


Figura 8: Metalografía compuesta de la sección transversal del cordón de soldadura en chapas de aluminio AA2219 con aporte de alambre de aleación AA2319 de origen nacional.

La imagen anterior representa una vista completa de la sección transversal del cordón de soldadura, donde las líneas punteadas indican las zonas de transición microestructural entre el material base y el material de aporte.

Se han indicado tres zonas que presentan patrones diferentes, el cordón de soldadura (Zona A), la frontera de transición entre material base y aporte afectada por el calor (Zona B) y el material base propiamente dicho (Zona C). En las imágenes siguientes se presenta un detalle de las condiciones microestructurales en cada una de las zonas remarcadas.

En búsqueda de conocer las propiedades mecánicas de cada una de las microestructuras presentes en la sección transversal de la pieza influenciadas por la soldadura se realizaron ensayos de microdureza Vickers en dos secciones diferentes del cordón de soldadura.

Tabla 4: Valores de microdureza en distintas zonas del cordón de soldadura.

Placa	Cordón [HV]	Transición [HV]	Zac [HV]	Material base [HV]
Sección 1	88-95	80 - 89	87 - 95	115 - 121
Sección 2	87 - 95	79 - 90	95 - 97	115 - 124

Los valores más bajos de dureza se presentan en el corazón del cordón de soldadura, mientras que evolucionan hacia un aumento de esta propiedad a medida que nos desplazamos hacia el material base.

También se mecanizaron probetas de tracción tecnológicas planas con el objetivo de estudiar las propiedades mecánicas y comportamiento del cordón de soldadura al ser sometido a esfuerzos de tracción.

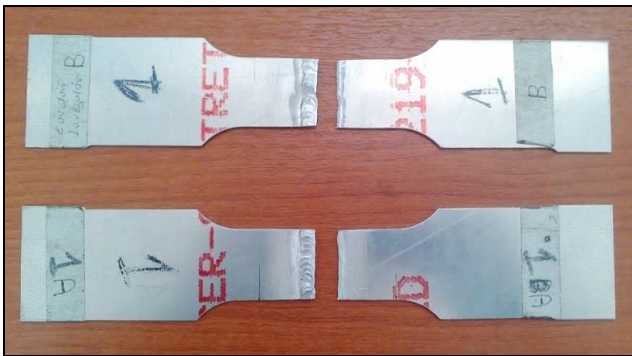


Figura 9: Detalle de rotura en zona afectada por el calor en probetas de tracción ensayadas.

Puede observarse que la rotura de todas las probetas se ha dado en la zona afectada por el calor, tal y como es de esperar en este tipo de muestras en las que no se ha mecanizado la sobremonta presente en los cordones de soldadura.

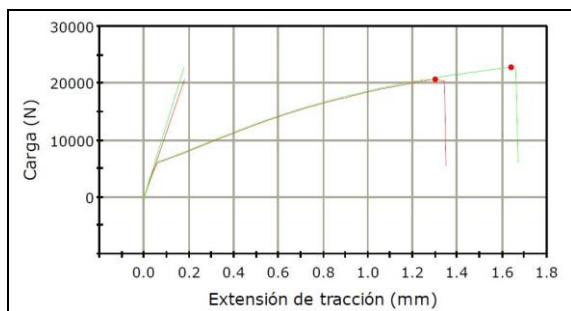


Figura 10: Curvas de tracción correspondientes a las probetas ensayadas.

Tabla 5: Valores de microdureza en distintas zonas del cordón de soldadura.

Probeta	Área transversal [mm ²]	Carga máxima de tracción [N]	Tensión máxima de tracción [MPa]
Curva roja	76,8	20663	269
Curva verde	79,5	22793	286

Si bien las curvas anteriores presentan una pequeña diferencia en cuanto a la carga máxima absorbida, se aprecia un comportamiento análogo entre probetas diferentes. Por otro lado se destaca que se han hecho numerosos ensayos de tracción para estudiar el cordón de soldadura con resultados análogos a los expuestos.

CONCLUSIONES

El conjunto de actividades desarrolladas ha demostrado que la metodología de trabajo propuesta ha sido acertada desde el punto de vista técnico. El material obtenido se encuentra, a excepción de una mínima diferencia en el porcentaje de Vanadio, dentro de los márgenes establecidos para la composición química típica de la aleación AA2319. No sólo puede destacarse el logro de la generación desde la concepción de la aleación, sino que a pesar de la rusticidad de algunos métodos empleados, tales como partir de barras con sección cuadrada para un proceso de trefilado y la influencia negativa que esto tiene desde el punto de vista de concentración de tensiones, geometría adversa respecto de la matriz de trefilado, etc. se ha alcanzado de manera satisfactoria la obtención de alambre de aleación AA2319. Más aún, no solo el insumo generado ha mostrado una completa sanidad desde el punto de vista físico, sino que además, como se ha observado a partir de los ensayos de microdureza Vickers y de tracción comparativos entre el material de origen nacional y el importado, que las características desde el punto de vista mecánico son muy similares, situación que respalda no solo la metodología de trabajo propuesta sino también la calidad del insumo final obtenido. De hecho, la diferencia promedio obtenida en valores de tensión máxima a partir de

los ensayos de tracción se ubica solamente alrededor de un 3 %. Las pequeñas diferencias respecto de las propiedades mecánicas entre el alambre nacional y el importado, se sustentan con las diferencias microestructurales de cada material, situación que puede ser trabajada y mejorada y no a problemas físicos del insumo obtenido. Las pruebas de soldadura se han llevado a cabo, como se dijo, sobre placas de aleación AA2219 con resultados satisfactorios no solo desde el punto de vista operativo al momento de la soldadura, sino también respecto de las cualidades de la pieza soldada, evaluadas desde el punto de vista mecánico a partir de ensayos de tracción habiendo obtenido valores de tensión de tracción promedio de aproximadamente 275 MPa. Por otro lado, al margen de la rigurosidad técnica, el desarrollo de las tareas propuestas y sus resultados ha demostrado que la disposición de los recursos e interés por parte del desarrollo en actividades de Ciencia y Tecnología, se traduce inevitablemente, a partir del compromiso y trabajo de los actores que la ejercen, en resultados palpables y desarrollos que pueden cumplir con los requerimientos establecidos al igual que cualquier insumo producido en otra parte del mundo. Entender la importancia de la inversión y desarrollo en Ciencia y Tecnología no sólo es importante desde el punto de vista técnico, sino también y más importante aún, desde la decisión de buscar alcanzar la posición de ser un país independiente y soberano en ésta materia.

REFERENCIAS

ASM Metals Handbook volumen 2, “Propiedades y selección de no ferrosos”, Introducción al aluminio y a sus aleaciones (p. 35 de la versión digital).

Ana Laura Cozzarín, Juan Lacoste, Danilo Vucetich, Daniel Tovia, Alfredo Gonzalez. Control del tamaño de grano en procesos termomecánicos de aleaciones de aluminio de alta resistencia. Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales SAM-CONAMET/IBEROMAT/MATERIA 2014. Santa Fé Argentina, 21–24 de Octubre de 2014. ISBN 978-987-692-043-8

V. Radkte “Spin-Rolling, Welding, and Heat Treatment of Aluminium 2219 for Ariane 5 GAM High Pressure Vessel Liners.”1992

Lacoste, Juan L., Cozzarín, Ana L .; González, Alfredo C. Estudio de Aleación de Aluminio de Alta Resistencia. Terceras Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión. La Plata, Argentina. 20 al 22 de Abril de 2015. ISBN 978-950-34-1189-6