



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Cd. Victoria



Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria

División de Estudios de Posgrado e Investigación

TESIS

Análisis de las deformaciones presentes en slats de aluminio que originan scrap en el proceso de SANI.

Presentada por

Ing. Humberto Jesús Fuentes Star

Como requisito para la obtención del grado de

Maestría en Ingeniería Industrial

Director de tesis

Dr. Ricardo Daniel López García

Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. Diciembre de 2020.

Dedicatoria

A mis padres Humberto y Rosa a quienes sin dudar me brindaron un apoyo incondicional y me animaron a realizar este gran paso en mi vida. Además de que sin ellos no sería la persona que soy hoy en día.

A mi pareja Isidra por apoyarme en todo momento para lograr este objetivo tan anhelado.

A mi hermana Iris por sus regaños, palabras de aliento y fuerza para seguir adelante con mis estudios.

Agradecimientos

Agradezco al Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria por brindarme la oportunidad de ingresar a uno de sus posgrados e incrementar mi nivel de conocimiento para aumentar mis posibilidades en el ámbito académico. Al CONACYT por otorgar el apoyo económico con el cual pude cumplir esta meta.

Al Doctor Ricardo López, quien ha sido un mentor y un apoyo sin igual, gracias a sus consejos y su constante apoyo se logró este proyecto, sin duda una figura admirable y un ejemplo a seguir.

A mis revisores Dra. Adriana Mexicano la cual impartió una gran sabiduría en sus clases impartidas en la maestría, las cuales me sirvieron para mejorar en el ámbito profesional y académico e igualmente a la Dra. Aracely Maldonado por el apoyo brindado en esta nueva etapa de éxito.

A mis compañeros a quienes les agradezco su apoyo en momentos difíciles y su gran amistad.

Al CINVESTAV por brindarme la oportunidad de utilizar sus instalaciones para la realización de mis pruebas.

RESUMEN

La generación de desperdicios o *scrap* es una de las preocupaciones más grandes en la industria a lo largo del tiempo se han realizado diversos métodos para que el *scrap* que se genera en los procesos de manufactura sea de 0, ya que debido a esta problemática las empresas presentan una gran pérdida económica la cual puede llegar a causar en el último de los ámbitos el cierre de la empresa. De tal forma que, el presente proyecto analiza una de las causas de generación de *scrap* en uno de los procesos con mayor generación de *scrap* de la empresa.

La información obtenida en la presente investigación cuenta con la finalidad de mostrar a la empresa una opción de mejora en el proceso SANI, para obtener una disminución en la generación del *scrap* realizando el debido análisis a la materia prima para la fabricación de las persianas venecianas, además de mostrar la causa de las presentes deformaciones en las tablillas (*slats*) de las persianas las causantes del *scrap* excesivo del proceso SANI.

Se tomaron muestra de la materia prima de llegada de los tres proveedores con un tamaño de alrededor de 5 ft de largo por 1 in de ancho, se procedió a recortar muestras con medidas de 6 in de largo por 1 in de ancho y de 0.5 in de alto por 1 in de ancho, estas últimas para montar la muestra en baquelita, además, se procedió a recortar otras muestras de 0.5 in de alto por 1 in de ancho para realizarles un tratamiento térmico de recocido con diferentes tiempos de permanencia que van de 30 a 120 minutos, con unas temperaturas de 450 °C a 600 °C, que al igual que las muestras anteriores se montaron en baquelita para su análisis.

Posteriormente, se realizó un análisis microestructural y de propiedades mecánicas (microdureza y UTS) de la materia prima tratada y no tratada térmicamente, un análisis por microscopia electrónica de barrido (MEB) para la caracterización de la morfología, seguida de un espectro de visión óptico por chispa para la obtención de la composición química del material, además de la utilización de un microdurómetro Vickers para la obtención de las propiedades mecánicas.

El objetivo de esta investigación fue encontrar las causas de las deformaciones de los *slats* de las persianas venecianas elaboradas en el proceso SANI, las cuales originan el excesivo *scrap* en el proceso y proporcionar a la empresa las mejores condiciones de la materia prima para la fabricación de los *slats* de las persianas venecianas con una disminución en la generación del *scrap* presente en el proceso SANI.

ABSTRACT

The generation of waste or scrap is one of the biggest concerns in the industry over time have been made several methods for the scrap that is generated in the manufacturing processes is 0, since due to this problem companies have a large economic loss which can cause in the last of the cases the closure of the company. Therefore, this project analyzes one of the causes of scrap generation in one of the processes with the highest scrap generation in the company.

The information obtained in this research is intended to show the company an option for improving the SANI process, in order to obtain a decrease in the generation of scrap by carrying out the appropriate analysis of the raw material for the manufacture of venetian blinds, as well as showing the cause of the present deformations in the slats of the blinds which are the cause of the excessive scrap of the SANI process.

Samples of the raw material from the three suppliers were taken with a size of about 5 feet long by 1 inch wide, Samples measuring 6 inches long by 1 inch wide and 0.5 inches high by 1 inch wide were pre-cut, the latter to mount the sample in bakelite, in addition, other samples were cut from 0.5 in high by 1 in wide to perform an annealing heat treatment with different dwell times ranging from 30 to 120 minutes, with temperatures from 450 °C to 600 °C, which like the previous samples were mounted in bakelite for analysis.

Afterwards, it was carried out a microstructural and mechanical properties analysis (microhardness and UTS) of the raw material treated and not thermally treated, an analysis by scanning electronic microscopy (SEM) for the characterization of the morphology, followed by an optical vision spectrum by spark to obtain the chemical composition of the material, besides the use of a Vickers microdurometer to obtain the mechanical properties.

The objective of this research was to find the causes of the deformations of the venetian blind slats produced in the SANI process, which cause excessive scrap in the process, and to provide the company with the best conditions of the raw material for the manufacture of the venetian blind slats with a decrease in the generation of scrap present in the SANI process.

Índice

Capítulo 1 Introducción	1
1.2 Descripción del problema	3
1.3 Hipótesis	6
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	7
1.5 Justificación	7
Capítulo 2. Antecedentes	8
2.1 El <i>scrap</i>	8
2.2 El Aluminio.....	8
2.3 Aleaciones de aluminio.....	10
2.4 Aleación 5xxx	12
2.4.1 Aplicación del aluminio 5xxx	13
2.5 Proceso de fabricación de láminas de aluminio	13
2.5.1 Laminación en frío.	14
Capítulo 3. Marco teórico.....	16
3.1 Endurecimiento por deformación en frío	17
3.1.1 Estructura cristalina.....	18
3.1.2. Tipos de estructura cristalina.....	19
3.1.3 Defectos de la estructura cristalina.....	22
3.2 Recuperación, recristalización y crecimiento de grano	25
3.2.1 Recuperación.....	26
3.2.2 Recristalización	26
3.2.3 Crecimiento de grano	27
CAPITULO 4 Marco referencial.....	28
4.1 Efectos de la composición química en la materia prima.....	28
4.2 Tratamientos térmicos de recocido	29
4.3 Efecto de la temperatura de recocido.....	30

4.4 Evolución de tamaño de grano.....	36
4.5 Análisis de las propiedades mecánicas	40
4.6 Formación de compuestos intermetálicos.....	40
Capítulo 5. Procedimiento experimental	42
5.1 Proceso SANI	42
5.1.1 Máquina SANI	42
5.1.2 Herramientas de la máquina.....	44
5.2 Análisis de la composición química	44
5.3 Tratamientos térmicos.....	45
5.4 Preparación metalográfica	45
5.5 Caracterización y análisis de imágenes mediante Imagepro.....	48
5.6 Pruebas de dureza	50
5.7 Prueba del Microscopio Electrónico de Barrido.....	51
Capítulo 6. Resultados y discusiones	52
6.1.- Composición química.....	52
6.2.- Ataque químico	54
6.3.- Evolución del tamaño de grano	55
6.4.- Caracterización microestructural y medición del tamaño de grano	67
6.5.- Análisis de fases e intermetálicos mediante MEB	69
6.6.- Microdureza Vickers	74
6.8.- Conclusiones.....	78
Bibliografía.....	79
ANEXOS 1	87
ANEXOS 2.....	91

Índice de tablas

Tabla I. Clasificación de las series de aluminio [12].....	11
Tabla II. Densidades de las dislocaciones cristalinas [28].	17
Tabla III. Sistemas cristalinos y redes de Bravais [34]	20
Tabla IV. Composición química de los proveedores.....	53
Tabla V. Composición nominal.....	53
Tabla VI. Propiedades mecánicas obtenidas de ensayos mecánicos a tensión de las muestras estudiadas.	78

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de procesos y proceso objetivo.....	3
Figura 2. Gráfica de Pareto del scrap que generan las áreas	4
Figura 3. Defectos de los slats de aluminio a) Vista de defecto en persiana ensamblada b) Gap c) Arco inverso.....	6
Figura 4. Proceso de laminado i) en frío ii) en caliente [19].....	13
Figura 5. Red cristalina y celdilla unitaria de tres vectores a, b y c [33]	20
Figura 6. Red cristalina del aluminio.	21
Figura 7. Granos y límites de grano [35].....	22
Figura 8. Defectos puntuales de la estructura cristalina [26].	23
Figura 9. Defecto lineal dislocaciones [26].....	23
Figura 10. Espacios de las dislocaciones [26]	24
Figura 11. Enlaces incompletos en la superficie [26].....	24
Figura 12. Límite de grano [26].	25
Figura 13. Relación de la microdureza y temperatura de recocido en una aleación de Al 5052 [49].	30
Figura 14. Micrografías de una aleación de Al 5052 rolada al 75% con tratamiento térmico de recocido por 4 horas: (a) Sin tratamiento térmico, (b) 220 °C, (c) 250 °C, (d) 300 °C, (e) 350 °C y (f) 380 °C [47].....	31
Figura 15. Efecto del tiempo de recocido sobre la microdureza para una aleación de Al 5052 rolada en frío con 70%, 80%, y 90% de reducción:(a) Colada Continua and (b) Colada Dinámica con unas temperaturas de 573°K, 673°K y 773°K. [48]	32
Figura 16. Microdureza de una aleación de a) aluminio 5052 y b) 5052 + Er, recocida a diferentes temperaturas por 30h [49].....	33
Figura 17. Variación de la dureza en base al tiempo de envejecimiento para muestras recocidas isotérmicamente [50]	34
Figura 18. Comparación de los tamaños de grano con las diferentes condiciones de recocido [50]	35
Figura 19. Microestructura de una aleación de Al 5052 recocida a 500°C por 1h: a) Rolada normalmente y b) Rolado de reloj (clock-Rolled) [53].	36
Figura 20. Desarrollo de microestructuras en la muestra con textura de recristalización cubica durante el recocido de 500°C por (a) 0 min, (b) 10 min, (c) 15 min, (d) 25 min, (e) 30 min and (f) 40 min. Granos en gris están orientados en textura cubica [53].....	37
Figura 21. Evolución de las microestructuras después de un recocido isócrono durante 1h a diferentes temperaturas [54]	37
Figura 22. Efecto de la temperatura de recocido y el grado de reducción en la microestructura del grano y la aparición de granos anormalmente grandes [55].....	38
Figura 23. Efecto del % de reducción en el crecimiento de grano durante el recocido de 480°C a 1h; a)40%; b)50%; c)64% y d)85% [55]	39
Figura 24. Máquina SANI	43

Figura 25. Apartado de formado.....	43
Figura 26. Grafica de ciclos de calentamiento	45
Figura 27. Prueba de reactivos	46
Figura 28. Piezas montadas en baquelita.....	47
Figura 29. Máquina para desbaste	47
Figura 30. Máquina de pulido	47
Figura 31. Microscopio KEYGENCE VH-Z500R.....	48
Figura 32. Calibración del software imagepro	49
Figura 33. Medición de tamaño de grano en el software imagepro	50
Figura 34. Huella de Microdureza Vickers.	50
Figura 35. Microdurometro Wilson 300FM.....	51
Figura 36. Microscopio electrónico de barrido PHILIPS XL30	51
Figura 37. Microestructuras obtenidas con reactivos: Keller, Weck y Beacker.....	54
Figura 38. Resultado del ataque químico con NaOH al 1%	55
Figura 39. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 450 °C y 30 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.	56
Figura 40. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 500 °C y 30 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.	57
Figura 41. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 550 °C y 30 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.	58
Figura 42. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 450 °C y 60 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.	59
Figura 43. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 500 °C y 60 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.	61
Figura 44. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 550 °C y 60 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.	62
Figura 45. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 450 °C y 120 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.	63
Figura 46. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 500 °C y 120 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.	64
Figura 47. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 550 °C y 120 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.	65
Figura 48. Tratamiento térmico a 600°C a) Reynosa b) Fuzhao c) Malasia.....	66
Figura 49. Resultado de tamaño de grano 30 minutos.	67
Figura 50. Resultado de tamaño de grano 60 minutos.	68
Figura 51. Resultado de tamaño de grano 120 minutos.	69
Figura 52. Fotografía del MEB muestra Reynosa	70
Figura 53. Fotografía del MEB muestra Fuzhao	71
Figura 54. Fotografía del MEB muestra Malasia	72
Figura 55. Análisis EDX de intermetálico color blanco.....	73
Figura 56. Análisis EDX de intermetálico color oscuro.....	74

Figura 57. Resultados de Microdureza 30 minutos	76
Figura 58. Resultados de Microdureza 60 minutos	77
Figura 59. Resultados de Microdureza 120 minutos	77

Capítulo 1 Introducción

La primera revolución industrial inició con el nacimiento de la primera máquina de vapor, inventada por James Watt en 1765. Fue precisamente en Inglaterra donde tuvo la llamada primera revolución industrial, es decir, donde comenzó la producción en masa, convirtiendo a dicho país en la primera potencia a nivel mundial en todos los sentidos, y demostró al mundo como se puede conquistar sin la fuerza de las armas [1]. Con la revolución industrial nació la industria tal y como la conocemos, y con ello, todos los problemas inherentes para hacer cada día la producción más eficiente. Para la fabricación de nuevas maquinarias u objetos no es como hoy en día si no que el ingeniero industrial tenía que decirles a los ingenieros mecánicos y metalúrgicos cómo debería ser la máquina que necesitaban y los ingenieros empezaban a realizar prototipos hasta que lograban el objetivo y ahí era cuando realizaban el plano. En este punto Henry Fayol, estableció los conceptos de administración que se conservan hasta la actualidad. En 1916 escribió su libro clásico administración industrial y general en donde describe su proceso de administración el cual está formado por planeación, dirección, administración y control. Además de Fayol tres grandes hombres cambiaron el curso de la historia en Estados Unidos de América y el mundo: Andrew Carnegie, Henry Ford y Frederick W. Taylor. Sus aplicaciones y aportaciones a la ingeniería son trascendentes básicamente por el instante histórico en que se originaron.

Con las innovaciones de los tres padres de la ingeniería industrial fueron apareciendo diferentes tipos de industrias. Se les considera industria a prácticamente todas las labores de producción a partir de materia prima. Existen diversos tipos de industrias dependiendo del sector específico de su producción. Algunos de los tipos más conocidos son: Industrias pesadas, industrias siderúrgicas o metalúrgicas, industrias químicas, petroquímicas, automovilísticas, alimentaria, textil, farmacéutica, armamentística, informática, mecánica, peletería, energética, telefónica, petrolera, manufacturera, entre muchas otras [2].

Las industrias manufactureras se dividen en dos tipos: productos elaborados los cuales son aquellos que están listos para ser comercializados y distribuidos, ya sean de consumo rápido o no y productos semielaborados, estos son insumos no definitivos o que forman parte de otros subsiguientes procesos de manufactura. Es decir, son productos para

alimentar otras fábricas que a su vez producen bienes elaborados. Este tipo de industria forma parte del sector secundario de la economía, es considerado el principal productor de riqueza, lo cual representa el principal sector económico en el llamado primer mundo, en contraste con la industria extractiva o materia prima en el tercer mundo [3].

En este sentido la industria en la fabricación, venta y distribución de persianas, uno de los principales fundadores de este tipo de empresas fue Edward Bevan quien perfeccionó el sistema de la persiana veneciana en el siglo XVIII. Incorporó un cordón sin fin y una polea para mover las láminas de madera encajadas en un marco. Durante esta época, una iglesia de Filadelfia fue pionera cubriendo sus ventanas con ellas. A lo largo del siglo XIX, este tipo de cortinas empezó a popularizarse. Pero, sin duda alguna, uno de los mayores pedidos de persianas venecianas de madera de la historia fue el del *Empire State* de Nueva York, que se encargó a la empresa Burlington *Venetian Blind Co.* Después de tanto tiempo, las persianas venecianas de madera y de aluminio siguen siendo tan populares como en antaño [4].

El presente trabajo, se llevó a cabo en la empresa Springs Window Fashions, que pertenece a la industria manufacturera con giro en la fabricación de persianas, la cual fue fundada en Middleton, Wisconsin en 1939 y cuenta con 14 instalaciones alrededor del mundo. La empresa situada en Cd. Victoria, Tamaulipas, México, fundada en el año 2009, es donde se desarrolla la parte de investigación del proyecto. En esta empresa, se fabrican distintos tipos de persianas los cuales son: persianas de PVC verticales, tela, vinil, especialidades y siendo el objeto de estudio las persianas horizontales de aluminio o más bien conocidas como persianas venecianas [5, 6].

El presente trabajo se enfoca en comprender el comportamiento del material utilizado para la fabricación de persianas venecianas, realizando diversas pruebas de metalografía las cuales consisten en; análisis de la composición química de las muestras, análisis microestructural, análisis de los diferentes compuestos intermetálicos, pruebas de dureza y tensión y comportamiento a diferentes temperaturas en un tratamiento térmico de recocido. Esto con la finalidad de obtener resultados que favorezcan a la disminución del *scrap* que se produce en la fabricación de las persianas venecianas fabricadas en *Springs Window Fashions*.

1.2 Descripción del problema

En la empresa Springs Window Fashions, se cuenta con diferentes procesos industriales para la fabricación de las persianas veneciana, los cuales se muestran mediante el siguiente diagrama de procesos.

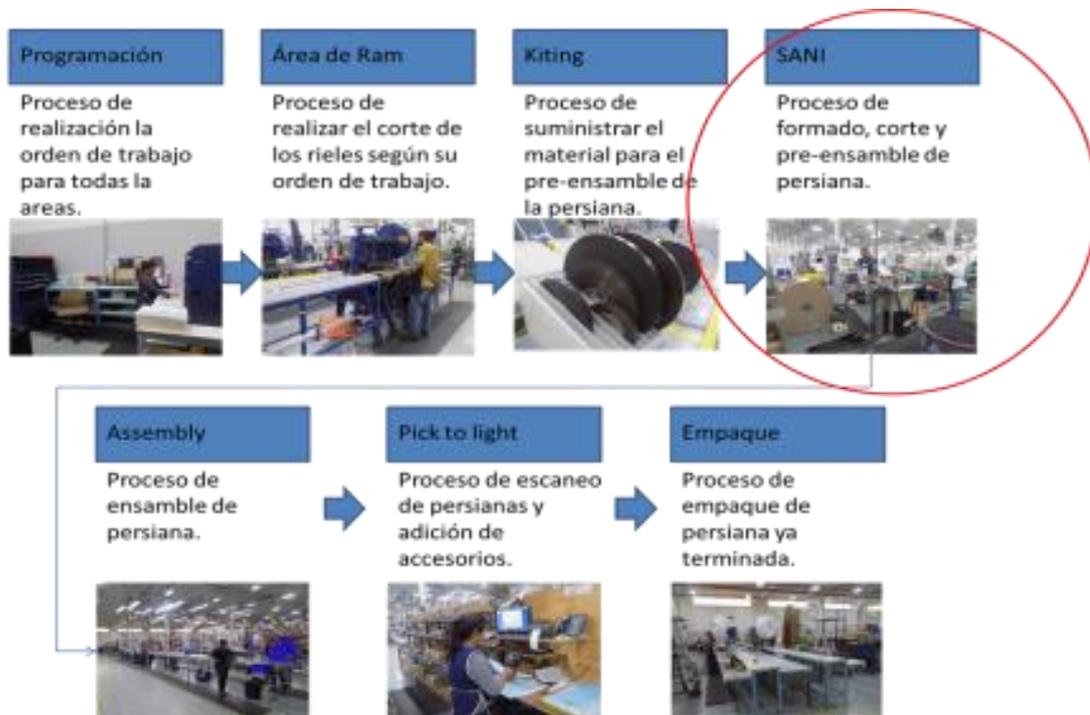


Figura 1. Diagrama de procesos y proceso objetivo

La Figura 1, muestra los procesos para la fabricación de una persiana veneciana los cuales consisten en la programación de la orden de trabajo de la persiana, posteriormente en el área de Ram se hacen los cortes de los rieles de la persiana, el proceso Kiting es donde se distribuye el material hacia el proceso de formado, SANI que es el proceso de formado y pre-ensamble, Ensamble de la persiana, *Pick to light* y empaque.

Durante el proceso de fabricación de las persianas de tipo venecianas, han presentado un incremento en la generación de *scrap* en las diferentes áreas del proceso, ocasionado pérdidas económicas significativas para la empresa.

En la Figura 2, se muestra mediante una gráfica de Pareto la distribución del *scrap* en las diferentes líneas de producción de las persianas tipo venecianas. De acuerdo al diagrama, el proceso en el cual la empresa debe concentrar sus esfuerzos es el proceso SANI (formado de tiras de aluminio) debido a que es el área que genera la mayor cantidad de

scrap con un 47%, las otras líneas de producción están por debajo de este porcentaje siendo estas de un 24%, 16%, 10% y 3% de *scrap*. El diagrama de Pareto en este caso indica que atacando el 20% de los procesos se logra corregir el 80% de los problemas y como se señala en la gráfica de Pareto el 20% de los procesos el cual genera la mayor cantidad de *scrap* es el proceso SANI.

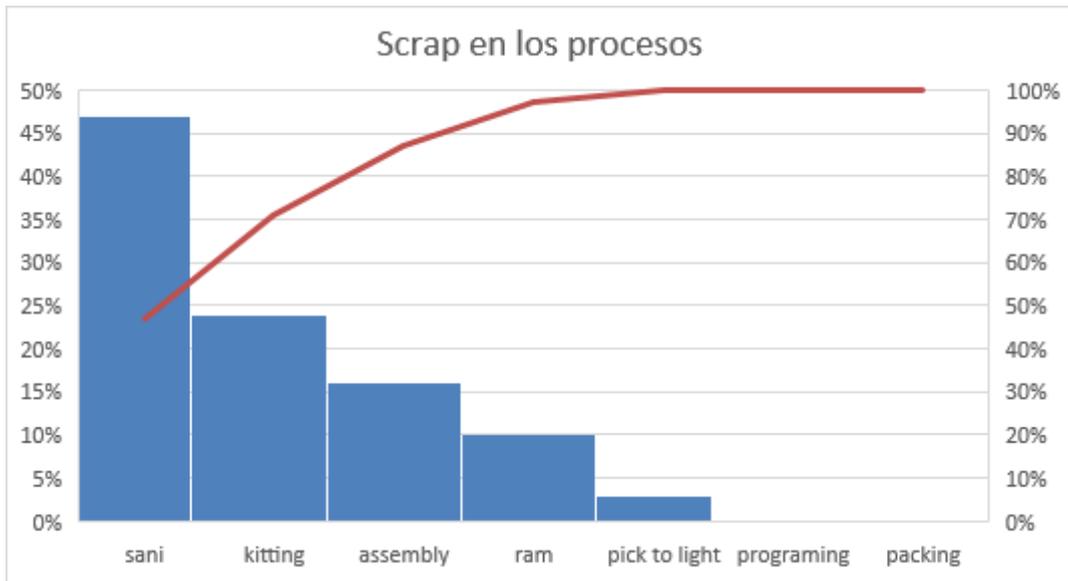


Figura 2. Gráfica de Pareto del scrap que generan las áreas

En el proceso de SANI, se identificaron diferentes defectos que impactan en la calidad de las persianas. Una de las variables más importantes a ser consideradas en la presente investigación es la materia prima la cual presentó diferente composición química de las aleaciones de aluminio proporcionadas por diferentes proveedores además de dos

diferentes espesores 6 y 8 milésimas de pulgada. Aunado a lo anterior, y al proceso no controlado de producción, se pueden presentar diferentes defectos en la calidad de las tiras de aluminio tales como: *Twist*, arco inverso y *gap*, falta de corona, daños mecánicos como lo son: golpes en el *coil*, daños por rodillos y abolladuras por imperfecciones y por último la falta de pintura en los *slats* de aluminio. En la Figura 3, se muestran algunos ejemplos de dichos defectos.

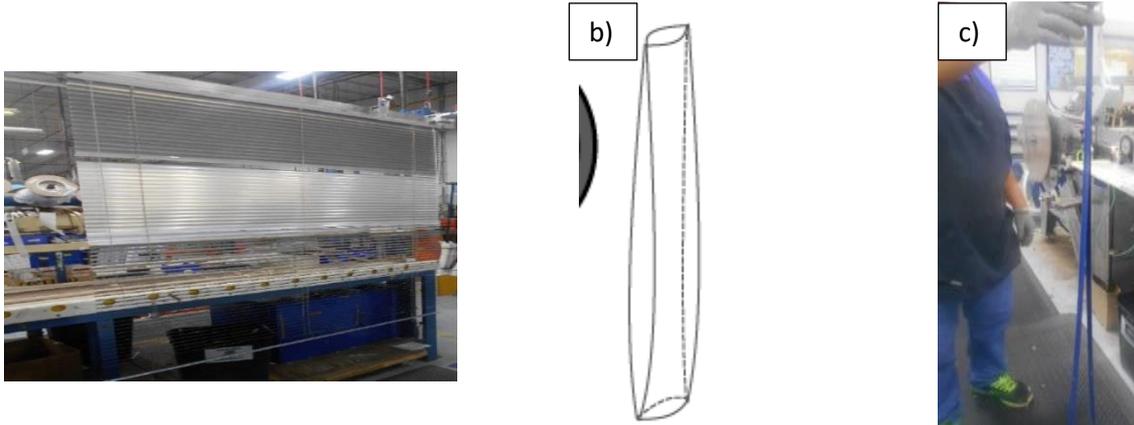


Figura 3. Defectos de los slats de aluminio a) Vista de defecto en persiana ensamblada b) Gap c) Arco inverso

Para minimizar el rango de las variables que producen estos defectos, se decidió estudiar los más significativos y de mayor recurrencia, siendo estos defectos las deformaciones de arco inverso y gap debido a que tiende a aparecer con mayor frecuencia en el proceso SANI.

1.3 Hipótesis

Determinando las propiedades y características químicas, físicas y mecánicas de las aleaciones de aluminio utilizados como materia prima para la fabricación de los *slats* para las persianas de Aluminio (Al), se podrá definir si la carga aplicada en el formado de las tiras de Al es adecuada. Además de determinar el origen y presencia de irregularidades que provocan las deformaciones en los *slats* de Al en el proceso de SANI, que dan origen a los altos porcentajes de *scrap*.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Realizar un estudio de las propiedades químicas, físicas y mecánicas de la materia prima utilizada para la fabricación de los *slats* de Al, para determinar las causas que originan el *scrap* en el proceso Sani.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar la composición química de la materia prima (aleaciones de aluminio) de los proveedores registrados en la empresa.
- Analizar las propiedades físicas y mecánicas de las aleaciones de Al.
- Analizar el proceso de SANI y determinar las áreas de oportunidad.
- Realizar un estudio para determinar el scrap generado en el proceso de SANI por un periodo de 1 mes.
- Realizar estudios de tratamientos térmicos de Recocido para mejorar las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio.
- Estudiar metalográficamente y mediante microscopía óptica y de barrido las microestructuras resultantes después de los tratamientos térmicos.
- Analizar los resultados de las propiedades de la materia prima de los diferentes proveedores y determinar cuál ofrece mejores características para el proceso de deformación en el proceso de SANI.

1.5 Justificación

Con el análisis a profundidad de las condiciones en las propiedades químicas, físicas y mecánicas de la materia prima de los diferentes proveedores, se puede determinar qué tipo de aleación presenta las propiedades fuera de rango y que pueden ser las causantes de la generación del *scrap* del proceso SANI, y así lograr evitar un alto volumen de *scrap* por las deformaciones en los *slats* de Aluminio.

con la puesta en marcha de este proyecto se le podrá informar a la empresa la causa de la generación del *scrap* en el proceso SANI, además de proporcionar una propuesta para mejorar las condiciones de la materia prima de los proveedores para que presenten una disminución en la generación del *scrap* por las deformaciones de los *slats* de Aluminio.

Capítulo 2. Antecedentes

2.1 El *scrap*

El *scrap* son los desperdicios, sobras de productos ya utilizados, materiales sobrantes o excedentes y equipamiento obsoleto, también se puede agregar materiales o productos no aptos para fabricación ya sea por defectos de origen o algún daño sufrido en el transporte. Uno de los conceptos más específicos manejado por las industrias según Borruto es todo material de descarte, deshecho, residuos no peligrosos, material que no puede ser utilizado para el proceso productivo, que haya sido tratado o modificado y que no tenga valor para otra empresa como materia prima o componente primario. Esto es uno de los problemas que se han ido presentando con el paso del tiempo en las industrias debido a la innovación a pasos agigantados en la mayoría de los procesos y productos lo cual lleva a volverse obsoleto al paso de poco tiempo [7].

La necesidad de mejorar e innovar partes en los procesos o productos terminados, así como reciclar o destruir productos que no reúnen las condiciones necesarias de calidad, provocan importantes pérdidas en una empresa, uno de las mejores maneras de reducir esas pérdidas es disminuyendo el *scrap* generado en los procesos. Algunos ejemplos de reducción del *scrap* es la aplicación de métodos y técnicas de mejora continua como: diagrama Ishikawa también conocido con el de causa y efecto, kaizen, manufactura esbelta, entre otras metodologías [8].

2.2 El Aluminio

En la empresa Springs Windows Fashion, durante el proceso de producción de las persianas venecianas se utiliza para su fabricación como materia prima principal el aluminio (Al) en forma de rollo de láminas. El Al es uno de los metales más abundantes sobre la corteza terrestre y corresponde a un 8,13%, superior a la del hierro, el cual es de un 5%. Dicho metal se destaca por su capacidad de resistir la corrosión y por su baja densidad, es atractivo para la industria, lo que ha hecho que este metal sea uno de los más importantes, tanto en cantidad como en variedad de aplicaciones. El aluminio se utiliza de manera natural, aleado con otros metales o en compuestos no metálicos. Su uso más popular es como papel aluminio, el cual consiste de una lámina con un espesor tan

delgado que resulta fácilmente maleable. Además, es ampliamente utilizado en la industria alimenticia para la fabricación de latas que funcionan como envases de bebidas [9]. La relación resistencia/peso es de gran importancia en la industria aeronáutica, debido a que un menor peso implica un ahorro de combustible para la aeronave; por lo que el aluminio es muy utilizado en esta industria, ya que con un menor peso puede alcanzar una resistencia comparable con la del acero. Por otro lado, la rápida oxidación que presentan los materiales ferrosos es una limitante para el uso de este tipo de materiales; caso contrario es observado en las piezas de aluminio, donde la oxidación es imperceptible bajo ciertos ambientes corrosivos, formándose una capa superficial de óxido de aluminio (Al_2O_3), la cual puede ser removida con un proceso de pulido, debido a que no se incorpora dentro de la matriz del Al. Además, debido a su elevada relación resistencia-peso y su casi débil resistencia mecánica tiene una buena ductilidad y maleabilidad, que permite forjarlo y trefilarlo en espesores muy pequeños como los hilos y además de la fácil laminación del mismo para la creación de láminas o paneles tan finos como los del oro hasta un espesor de 0,4 micras. Esto es muy útil para construir aviones, vagones ferroviarios y automóviles, y para otras aplicaciones en las que es importante la movilidad y la conservación de energía [10].

Su elevada conductividad calorífica e inalterabilidad lo hacen útil para la fabricación de utensilios de cocina y, en general, para aparatos de intercambio de calor. Además, por sus propiedades reductoras es utilizado en la desoxidación del hierro y de otros metales, y para las soldaduras aluminio-térmicas, además de eso el aluminio posee una densidad de 2.7 g/cm^3 aproximadamente un tercio del acero, cobre o latón. El aluminio posee una excelente resistencia a la oxidación en la mayoría de los ambientes como al aire libre, ambientes húmedos incluyendo los ambientes marinos, ambientes petroquímicos y muchos ambientes químicos, también el aluminio posee una superficie que es altamente reflectiva, con esa superficie pueden irradiar energía, visiblemente luminosos, irradian calor y además reflejan efectivamente las ondas electromagnéticas. Cuando se realiza un anodizado la superficie del aluminio puede reflejar o absorber respectivamente y la reflectancia del pulido del aluminio sirve para grandes longitudes de onda además de usos decorativos y funcionales [11].

2.3 Aleaciones de aluminio

Dado que el aluminio puro por sí sólo no posee buenas propiedades mecánicas, es aleado con otros elementos generalmente mediante fundición o aleado mecánico para mejorar estas propiedades. La clasificación del aluminio y sus aleaciones se divide en dos grandes grupos: de forja y fundición. Los principales metales empleados para la creación de aleaciones con aluminio son los siguientes: Cobre (Cu), silicio (Si), zinc (Zn), magnesio (Mg), y manganeso (Mn). Y los que se pueden considerar como secundarios, son los siguientes: Níquel (Ni), titanio (Ti), hierro (Fe), cromo (Cr) y cobalto (Co). Sólo en casos especiales se adicionan con: Plomo (Pb), cadmio (Cd), antimonio (Sb) y bismuto (Bi) [9,10,12].

2.3.1 Clasificación del aluminio

El aluminio suele encontrarse en forma de aleaciones, mezcladas con otros metales que mejoran sus características naturales. Las aleaciones de aluminio son aleaciones en las que el aluminio es el material que predomina. Dentro de la clasificación de las aleaciones de Al se encuentra empleado un sistema de 4 dígitos, este sistema es: serie 1xxx, 2xxx, 3xxx, 4xxx, **5xxx**, 6xxx, 7xxx y 8xxx [9,12-14].

El primer dígito (X xxx) indica el principal elemento, que se ha añadido a la aleación de aluminio y también se utiliza para describir la serie de la aleación de aluminio a la que pertenece, es decir, serie 1000, serie 2000, serie 3000, y así sucesivamente hasta serie 8000. Los principales componentes de cada serie son:

- Serie 1000: 99% de aluminio como mínimo (aluminio puro)
- Serie 2000: Cobre
- Serie 3000: Manganeso
- Serie 4000: Silicio
- **Serie 5000: Magnesio**
- Serie 6000: Magnesio y silicio
- Serie 7000: Zinc
- Serie 8000: otros elementos

El segundo dígito de la serie (x X xx), si es distinto de 0, está indicando una modificación de la aleación específica. Por otro lado, el dígito 3º y 4º de la serie son números arbitrarios

que identifican a las aleaciones específicas de la serie por ejemplo dando el porcentaje mínimo de aluminio de la aleación u otros componentes.

Estas series se separan en forja y fundición dependiendo de cada uno de los elementos, así como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de las series de aluminio [12]

Aleaciones para forja:	
1xxx	Aluminio comercialmente puro (>99% Al)
2xxx	Al-Cu y Al-Cu-Li
3xxx	Al-Mn
4xxx	Al-Si y Al-Mg-Si
5xxx	Al-Mg
6xxx	Al-Mg-Si
7xxx	Al-Mg-Zn
8xxx	Al-Li, Sn, Zr, o B
Aleaciones para fundición:	
1xxx	Aluminio comercialmente puro (>99% Al)
2xxx	Al-Cu
3xxx	Al-Si-Cu o Al-Mg-Si
4xxx	Al-Si
5xxx	Al-Mg
7xxx	Al-Mg-Zn
8xxx	Al-Zn

Cabe mencionar en la clasificación de forja se encuentra una subdivisión de dichas series las cuales son: tratables térmicamente y no tratables térmicamente. Las series principales de las no tratables térmicamente son: 1xxx, 3xxx y **5xxx**. Dentro de las tratables térmicamente las series principales son: 2xxx, 6xxx y 7xxx. Esto se debe principalmente a que las aleaciones de aluminio para forja no tratables térmicamente no pueden ser endurecidas por precipitación y sólo pueden trabajarse en frío para aumentar su resistencia.

Además de la clasificación por su estado el cual se le agrega después de la serie de la aleación en forma de letras (1xxx Tx, F, W, Hx, Ox), dos letras no tienen un número siguiente debido a que la F representa el estado bruto de la serie y la W un tratamiento térmico después de ya haber recibido uno y haber quedado con una estructura inestable [15].

Las otras letras representan lo siguiente: O representa un tratamiento térmico de recocido y sus dígitos representan O1 recocido a elevada temperatura y enfriamiento lento, O2 sometido a tratamiento termo-mecánico y O3 homogeneizado. La H representa el estado de acritud y sus dígitos H1 endurecido por deformación hasta obtener el nivel deseado y sin tratamiento posterior, H2 endurecido en exceso por deformación y recocido parcial para recuperar maleabilidad sin perder ductilidad, H3 acritud y estabilizado y H4 acritud y lacado o pintado. Y por último la T que representa los tratamientos térmicos que se le hacen a las aleaciones y sus dígitos T1 enfriado desde una alta temperatura durante el proceso de conformación y envejecido naturalmente, T2 enfriado desde una alta temperatura durante el proceso de conformación, trabajado en frío y envejecido naturalmente, T3 tratamiento térmico de solución, trabajado en frío y envejecido naturalmente, T4 tratamiento térmico de solución y envejecido naturalmente, T5 enfriado desde una alta temperatura durante el proceso de conformación y envejecido artificialmente, T6 tratamiento térmico de solución y luego envejecido artificialmente, T7 tratamiento térmico de solución y luego envejecido artificialmente, T8 tratamiento térmico de solución, trabajado en frío y envejecido artificialmente y T9 tratamiento térmico de solución, envejecido artificialmente y trabajado en frío.

2.4 Aleación 5xxx

La materia prima utilizada en la fabricación de las persianas de Al, pertenece a la serie 5xxx o 5000, por ello el interés de profundizar en el conocimiento de esta aleación. Primero, debemos mencionar que el Mg es el elemento más importante en esta aleación, también se añaden pequeñas cantidades de Mn para endurecer la aleación de Al. El Mg es un elemento que endurece más al aluminio que el Mn (un 0.8% de Mg produce el mismo efecto que un 1.25% de Mn) y además se puede añadir más cantidad de Mg que de Mn. Las principales características de estas aleaciones son; una dureza media a alta por endurecimiento por deformación, buena soldabilidad y buena resistencia a la corrosión en ambiente marino [15]. Una de las características de esta aleación debido a su alto contenido de Mg y para trabajado en frío, es que se deben establecer ciertas limitaciones en cantidad de trabajo en frío, la temperatura de operación permisible para el trabajo en frío del aluminio en altas concentraciones de Mg (aproximadamente de 3.5%

en adelante) es de 65°C o 150°F para evitar el agrietamiento por corrosión bajo tensión en el aluminio y deterioro del mismo [11].

2.4.1 Aplicación del aluminio 5xxx

La serie 5xxx normalmente se utiliza en aplicaciones en las que se requiere: resistencia a la corrosión, alta dureza, buen comportamiento a tratamientos superficiales y un buen acabado superficial. Son utilizadas en la fabricación de buques, vehículos, partes de soldadura de aviones, tanques de gasolina de los mismos aviones, rieles ligeros para subterráneo, recipientes a presión, carro refrigerado, equipo de perforación, piezas de equipo de transporte, piezas de misiles, armadura militar, adornos decorativos, ornamentales y arquitectónicos en el hogar, iluminación de las calles y carreteras y además por su alta resistencia a la corrosión se aplica en herramientas marítimas [15].

2.5 Proceso de fabricación de láminas de aluminio

El proceso para la fabricación de láminas de aluminio, se conoce como laminación o proceso de laminado, y consiste en la deformación volumétrica en el que se reduce el espesor inicial del material trabajado mediante la compresión aplicada por rodillos o por medio de canales tallados, por lo tanto, este proceso se aplica sobre materiales con un buen nivel de maleabilidad, para dar obtener formas complejas [17].

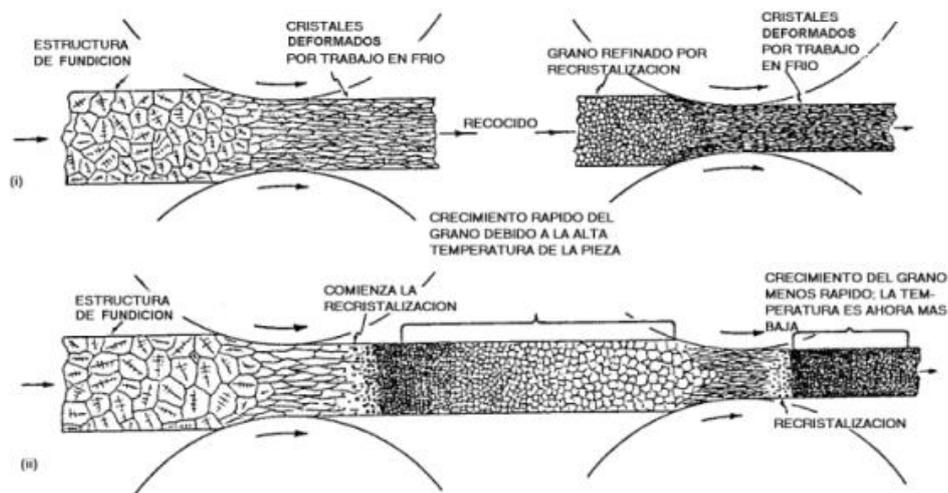


Figura 4. Proceso de laminado i) en frío ii) en caliente [19]

En su forma más elemental, un laminador está constituido por dos o más cilindros que giran en sentidos contrarios entre sí. La distancia entre las superficies cilíndricas enfrentadas es siempre menor que el espesor inicial del lingote, por lo que éste, al pasar entre los dos cilindros se aplasta y se alarga proporcionalmente a la reducción de sección tal como se muestra en la Figura 4 [18]. Hay que mencionar que en este proceso se presentan altas deformaciones plásticas en el material, por lo tanto, el estudio a profundidad de los fenómenos que se presentan durante el proceso es importante en este trabajo.

En si el proceso de laminado es hacer pasar un metal entre dos rodillos separados por un hueco menor al espesor del metal entrante, y que rotan en sentido contrario entre sí.

Existen dos tipos de laminación los cuales son la laminación en caliente la cual consiste en calentar el material a trabajar para mayor facilidad de laminado y se requiere menor fuerza para la deformación requerida, y el laminado en frío, que es el proceso de manufactura al cual son sometidas las láminas de aluminio para la fabricación de los *slats* estudiados en esta investigación.

2.5.1 Laminación en frío.

Se le conoce como laminado en frío al proceso continuo de deformación a alta velocidad, manteniendo la temperatura por debajo del punto de cristalización del material. El cambio de volumen se produce en la dirección de laminado, por debajo de su temperatura de recristalización, a temperatura ambiente, aumentando la resistencia por endurecimiento del material y mejorando también el acabado [20]. El proceso de laminado en frío se lleva a cabo a temperatura ambiente. A diferencia del proceso de laminación en caliente, el laminado en frío produce láminas y tiras con un acabado superficial mejor debido a que no hay presencia de óxidos y cascarillas, además se tienen mejores tolerancias dimensionales y mejores propiedades mecánicas debidas al endurecimiento por deformación [17]. Este proceso tiene el mismo fundamento que el de laminación en caliente, es decir, producir una deformación permanente aprovechando la ductilidad del material; donde se hace pasar el material entre dos cilindros cuya separación es inferior al espesor de la banda original [18].

El laminado en frío a diferencia del laminado en caliente llevan un recocido entre cada una de las pasadas por rodillo como se mostró en la Figura 4, para regenerar la deformación generada sin afectar sus propiedades mecánicas.

2.5.1.1 Ventajas del laminado en frío

Dentro de las principales ventajas del proceso de laminado en frío se encuentra un buen acabado superficial, buen control dimensional, bajo porcentaje de reducción posible, no es necesario calentamiento, fácil producción en masa, excepcional tiempo de duración de la forma, minimiza la contaminación y presenta mejores propiedades mecánicas que el formado en caliente [21]. Y como desventaja del proceso, se puede mencionar que se requiere un recocido posterior para aliviar los esfuerzos residuales ocasionados por la deformación plástica (acritud) [19].

2.5.1.2 Tratamiento térmico de recocido

El recocido es un término térmico que consiste en calentar y mantener a una temperatura óptima el material, seguido de un enfriamiento a una velocidad adecuada, el objetivo es el ablandamiento de materiales metálicos. Por ejemplo, en los aceros con bajo contenido de carbono, el recocido produce una microestructura de ferrita-perlita, con una mejora en la ductilidad para facilitar el trabajo en frío o mecanizado. Mientras que en las aleaciones de aluminio para la serie 5000 al ser una aleación no tratable térmicamente, un tratamiento térmico de recocido hace que el material se haga más blando, dúctil y con mejores condiciones de trabajo, sin embargo, no se endurece con el tratamiento. La elección de las condiciones de un tratamiento térmico de recocido que proporcionará una adecuada combinación de las diferentes propiedades buscadas en los materiales metálicos, requiere de un análisis y estudio de las variables que intervienen en dicho tratamiento [22-23]. Hay que mencionar, que el tratamiento térmico de recocido, reduce la dureza del material, aumenta la ductilidad y ayuda a eliminar los esfuerzos internos provocados por procesos de manufactura o tratamientos previos. Esto ocurre cuando el material es tratable térmicamente, en cambio cuando no es tratable térmicamente el recocido se denomina recocido por recristalización y es un proceso que se aplica a metales trabajados en frío para obtener la etapa de nucleación y el crecimiento de nuevos granos sin presentar

cambios de fases [24]. Además de los metales la mayoría de las aleaciones no ferrosas que se endurecen por el trabajo en frío pueden restaurar esencialmente su estructura de grano original mediante el proceso de recocido, durante el cual se produce el proceso de recristalización. Este proceso está estrechamente relacionado con el proceso de recocido de aceros de bajo contenido en carbono, que incluye una cierta cantidad de crecimiento de grano resultante del tratamiento de recocido que puede controlarse en gran medida mediante el tiempo y la temperatura que tendrá el proceso de recocido [25].

El tratamiento de recocido es empleado para las diferentes series de las aleaciones en condiciones específicas (tiempo, temperatura y composición química), debido a que cada aleación requiere diferentes condiciones y variables de procesamiento [25]. Existen diferentes tipos de tratamientos térmicos de recocido, uno es el recocido completo, que se utiliza en las aleaciones de aluminio ya sean o no tratables térmicamente las mejores condiciones de ductilidad, alta formabilidad y mejora las condiciones de trabajo, además de como se mencionó anteriormente elimina los efectos del trabajo en frío presentes en el material. Para las aleaciones de Al, las temperaturas de recocido completo se encuentran oscilando entre los 260°C y 440°C dependiendo de su composición química, una vez alcanzando los 415°C se presenta oxidación en el material además de crecimiento de grano. El recocido parcial, es utilizado para trabajo en frío como se mencionó con anterioridad, a este recocido se le conoce como recocido de recuperación, recocido para aliviar los esfuerzos residuales, y para eliminar los efectos del endurecimiento por deformación. Este tipo de recocido utiliza temperaturas de 345°C hasta 400°C y el recocido de piezas fundidas el cual consiste en realizar un recocido de 2 a 4 horas a temperaturas de 315°C a 345°C lo cual proporciona un alivio de esfuerzos residuales más completo y precipitaciones de las fases formadas por el exceso de soluto [21].

El tratamiento térmico de recocido es utilizado en los materiales trabajados en frío para iniciar el proceso de nucleación, el proceso de laminación en frío es necesario en los rollos de aluminio para disminuir sus propiedades mecánicas al realizar un alto esfuerzo, así como obtener el espesor deseado [23].

Capítulo 3. Marco teórico

Los materiales metálicos al someterse a diferentes esfuerzos pueden sufrir deformaciones plásticas y elásticas. Las deformaciones elásticas son aquellas que se presentan cuando se realiza un esfuerzo sobre el material y este recupera su forma original al retirarle la fuerza aplicada, esta deformación es similar a la de un resorte cuando se estira el resorte tiende a alargarse, pero, cuando se le retira la fuerza de trabajo este regresa a su forma inicial. Por otra parte, la deformación plástica es la deformación que ocurre cuando se le aplica fuerza a un material y este no regresa a su forma original después de retirarle la fuerza, esta deformación permite cambiar la forma del material de manera permanente [26]. El proceso de deformación en frío de los metales provoca una distorsión en la estructura cristalina del material que puede provocar una disminución en sus propiedades y características mecánicas debido a las altas deformaciones plásticas presentes. Cuando se deforma un material, los granos generalmente se distorsionan y alargan en una o más direcciones, lo que hace que el material sea isotrópico (las propiedades dependen del sentido de la orientación de grano). La isotropía se puede definir como una propiedad física o mecánica de un material en diferentes direcciones durante el ensayo. Es muy importante reconocer la dirección de alargamiento del grano para poder elegir la mejor orientación de la pieza cuando se está trabajando [21].

3.1 Endurecimiento por deformación en frío

El endurecimiento por deformación plástica en frío, es el fenómeno por medio del cual un metal dúctil se vuelve más duro y resistente a medida que se deforma plásticamente. Generalmente a este fenómeno también se le llama trabajo en frío, debido a que la deformación se da a una temperatura “fría o ambiente” relativa a la temperatura de fusión absoluta del metal [27]. Cuando un material metálico se deforma en frío, como se presenta en este caso por medio de laminación, se produce en el metal variaciones en su estructura cristalina y características físicas, la estructura del grano se presenta más alargada. Pero el principal objetivo de la deformación plástica, es el incremento del número de la densidad de las dislocaciones, como puede observarse en la Tabla 2 [28]:

Tabla II. Densidades de las dislocaciones cristalinas [28].

Densidad de dislocación en cm^2	
En estado de colada o recocido	10^7
En estado restaurado	10^{10}
Con fuerte laminación	10^{12}

El fenómeno de endurecimiento por deformación se explica de la siguiente manera: 1. El metal posee dislocaciones en su estructura cristalina. 2. Cuando se aplica una fuerza sobre el material, las dislocaciones se desplazan causando la deformación plástica. 3. Al moverse las dislocaciones, aumentan en número. 4. Al haber más dislocaciones en la estructura del metal, se estorban entre sí, volviendo más difícil su movimiento. 5. Al ser más difícil que las dislocaciones se muevan, se requiere de una fuerza mayor para mantenerlas en movimiento. Se dice entonces que el material se ha endurecido [27].

3.1.1 Estructura cristalina

La estructura cristalina es uno de los estados sólidos que pueden adoptar en la naturaleza los átomos, iones o moléculas, el cual se caracteriza por tener un gran ordenamiento espacial. En otras palabras, ésta es una evidencia de la “arquitectura corpuscular” que define muchos cuerpos con apariencias vítreas y brillantes. ¿Qué es lo que hace que adopten esa forma? Las partículas no están solas si no que interactúan entre sí, esto conlleva un gasto de energía lo que afecta a la estabilidad del sólido, de modo que las partículas buscan acomodarse de tal manera que tengan una mínima pérdida energética y eso es lo que los lleva a tomar dicha forma para mantenerse estables. Un ejemplo de esto puede ser aquel donde las repulsiones entre iones con iguales cargas sean mínimas, o donde también unos átomos “como en los materiales metálicos” ocupen el mayor volumen posible en sus empaquetamientos [29]. También se dice que una estructura cristalina es un conjunto de átomos dispuestos periódicamente en el espacio, es decir, que puede construirse mediante la superposición de bloques idénticos distribuidos a lo largo del espacio. Estos bloques idénticos se denominan base y la forma en la que se distribuyen en el espacio, se conoce como red cristalina [30]:

Estructura cristalina = base + red cristalina

Algunos científicos mencionan que la estructura cristalina es un concepto teórico el cual permite identificar y comprender cómo están formados los materiales. A partir de este concepto es posible explicar muchas de las propiedades que exhiben los materiales sean estos cristalinos o amorfos. [26]. Los materiales en estado amorfo son aquellos en donde las partículas que componen el sólido se agrupan al azar, es decir, están en diferentes puntos en el espacio y no representan algún orden o forma regular, por otro lado, está el estado cristalino que es cuando los átomos (moléculas o iones) que componen el sólido se disponen según un orden regular. Las partículas se sitúan ocupando los nodos o puntos singulares de una red espacial geométrica tridimensional, esto quiere decir que cuando se encuentran en estado cristalino los átomos adoptan una forma regular ya sea de una figura geométrica tal como la cubica, hexagonal, tetragonal, entre otras [31].

3.1.2. Tipos de estructura cristalina

En los gases los átomos no se encuentran ordenados estructuralmente hablando, sin embargo, cuando los átomos están ordenados con un patrón que se repite en el espacio, dicho patrón forma un sólido que tiene un orden de largo alcance al cual se le denomina sólido cristalino. Algunos ejemplos de este orden son: metales, aleaciones y algunos cerámicos, además del orden de largo alcance existe otro en el cual los átomos no están ordenados a largo alcance, periódicos y repetibles. Si no que están ordenados en un orden de corto alcance, estos son los materiales líquidos, un ejemplo de este es el agua. A los materiales de este orden se les conoce como materiales amorfos o no cristalinos [32].

Dentro del ordenamiento de largo alcance se pueden apreciar diferentes figuras las cuales son características de los distintos materiales, en este caso los metales cuentan con 14 diferentes redes cristalinas que son características del material analizado. A estas redes cristalinas se les conoce como redes de Bravais las cuales son descritas con mayor facilidad por medio de la “celdilla unitaria” La celdilla unitaria queda definida por vectores de traslación de red (vectores que conectan puntos de la red) tal como se muestra en la Figura 5.

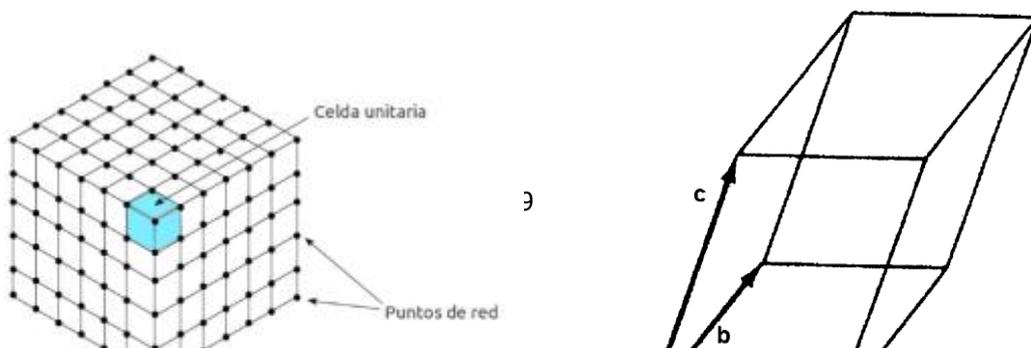
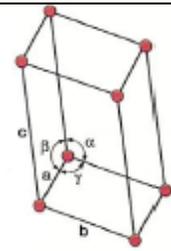
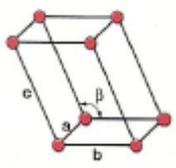
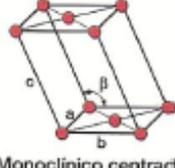
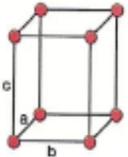
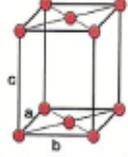
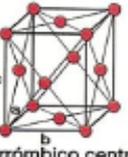
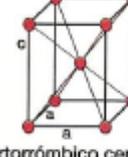
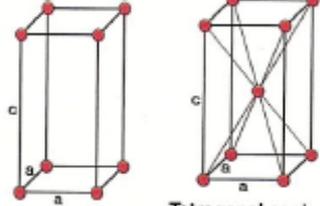
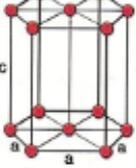
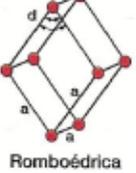


Figura 5. Red cristalina y celdilla unitaria de tres vectores a , b y c [33]

Las 14 redes de Bravais pueden ser definidas sólo por 7 sistemas cristalinos diferentes, como se aprecia en la Tabla III.

Tabla III. Sistemas cristalinos y redes de Bravais [34]

Sistema	Red cristalina de Bravais
Triclínico	 <p>Triclínica</p>
Monoclínico	 <p>Monoclínico sencillo</p>  <p>Monoclínico centrado en las bases</p>
Ortorrómbico	 <p>Ortorrómbico sencillo</p>  <p>Ortorrómbico centrado en las bases</p>  <p>Ortorrómbico centrado en las caras</p>  <p>Ortorrómbico centrado en el cuerpo</p>

Tetragonal	 <p>Tetragonal sencillo Tetragonal centrado en el cuerpo</p>
Cúbico	 <p>Cúbico sencillo Cúbico centrado en las caras Cúbico centrado en el cuerpo</p>
Hexagonal	 <p>Hexagonal</p>
Romboédrico	 <p>Romboédrica</p>

Los metales poseen una red cristalina característica de su composición química, tomando esto en cuenta, el aluminio posee una red cristalina cúbica centrada en las caras (FCC por sus siglas en inglés) la cual se caracteriza por tener 4 átomos en su celda unitaria. Las redes cristalinas FCC están compuestas por 4 átomos los cuales están ubicados en las ocho esquinas del cubo a los cuales forman un átomo ya que esos átomos se encuentran compartidos con las demás celdas unitarias adyacentes y 6 mitades que se encuentran en las caras del cubo, la suma de las esquinas y las caras adyacentes da un total de 4 átomos en la celda unitaria como se muestra en la Figura 6 [35].

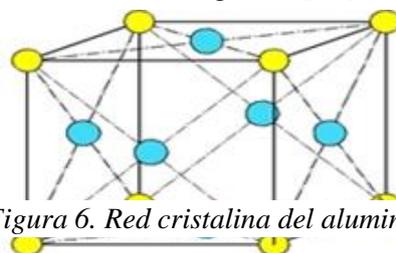


Figura 6. Red cristalina del aluminio.

A medida que los átomos se agregan para formar una red cristalina en el punto de solidificación, los grupos de estos átomos forman pequeños cristales. Estos cristales aumentan de tamaño mediante la adición progresiva de átomos. El sólido resultante no es un cristal, sino muchos cristales más pequeños llamados granos. Estos granos crecen hasta que inciden en cristales adyacentes en crecimiento. La interfaz

formada entre ellos se llama límite de grano. Los granos a veces son lo suficientemente grandes como para ser visibles bajo un microscopio de luz ordinaria. En la Figura 7, se muestra una vista típica de los granos y límites de grano en los metales.

Figura 7. Granos y límites de grano [35]

3.1.3 Defectos de la estructura cristalina

El plantear que un material es clasificado como cristalino y poseer una estructura cristalina bien definida es una idealización que no siempre se cumple en los materiales. Esas diferencias pueden explicarse planteando que el modelo del arreglo atómico puede poseer defectos internos. En la estructura cristalina existen diversos defectos que alteran la posición ideal de la estructura cristalina. Estos defectos son los defectos puntuales, lineales y de superficie [26].

- a) El defecto puntual: se da a nivel de los átomos individuales. Los principales defectos puntuales son; las vacancias que son puntos de red vacíos en la estructura del material. Estos lugares deberían ser idealmente ocupados por átomos, sin embargo, en algunos casos se encuentran vacíos. Los átomos sustitucionales son aquellos átomos que son diferentes del material original. Esto se debe a que los materiales en la realidad no son 100% puros y esas impurezas son las que sustituyen el átomo de la estructura cristalina y por último el átomo intrínseco, este tipo de átomos ocupan otro lugar que no está definido por la estructura cristalina. En otras palabras, son átomos que cuya posición no está definida por un punto en la red lo que quiere decir que está en un lugar donde no debería encontrarse [26].

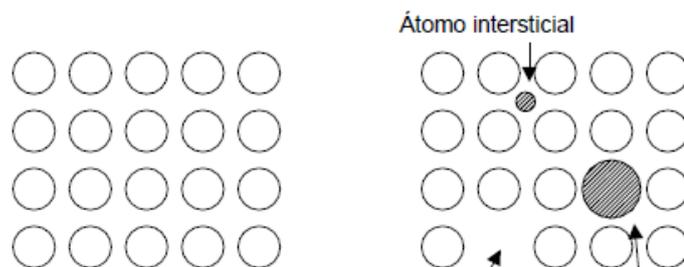


Figura 8. Defectos puntuales de la estructura cristalina [26].

b) Defectos lineales: este defecto es a nivel de varios átomos generalmente a un plano. Los defectos lineales más importantes en los materiales son las dislocaciones, estas se generan durante la solidificación o la deformación plástica de los materiales cristalinos y consiste en planos “extra” de átomos insertados en la estructura cristalina, así como se muestra en la Figura 9 [20].

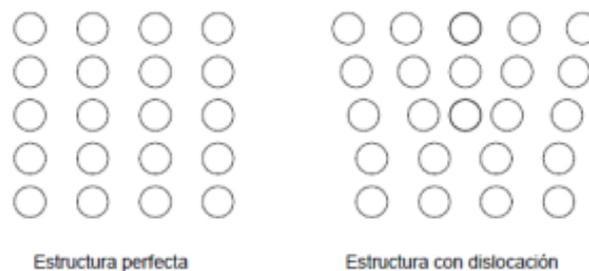


Figura 9. Defecto lineal dislocaciones [26].

Las dislocaciones están formadas por los átomos originales del material (no por impurezas). Debido a que el plano de átomos está insertado en la estructura en lugares no definidos por la misma, las dislocaciones causan la deformación del material cercano a ellas. Los átomos en la estructura perfecta se encuentran a una distancia fija de equilibrio entre sí. La presencia de las dislocaciones (y también de los defectos puntuales) altera esta distancia de equilibrio tal como se muestra en la Figura 10.

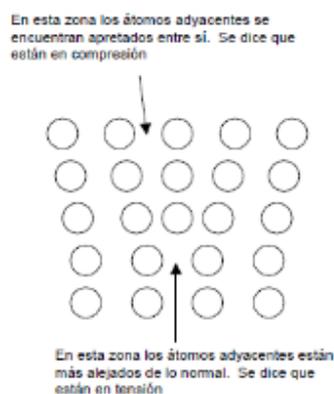


Figura 10. Espacios de las dislocaciones [26]

Las dislocaciones cuentan con 2 características importantes, la primera es que tienen la capacidad de moverse o desplazarse en el interior del material y la segunda es cuando las dislocaciones se desplazan y se dividen aumentando el número de dislocaciones presentes en el material. Cuando se aplica fuerza sobre una dislocación esta se desplaza sobre un plano específico y en determinada dirección. Al plano se le conoce como plano de desplazamiento y a la dirección se le llama dirección de desplazamiento. A la combinación de ambos desplazamientos se le conoce como sistema de deslizamiento.

- c) Defectos de superficie: son imperfecciones de la estructura cristalina ubicados en un área determinada del material. Los principales defectos de superficie son la misma superficie del material y las fronteras de los granos.

La superficie del material es un defecto de la estructura cristalina porque se rompe la simetría con que los átomos están enlazados. Los átomos que se encuentran en la superficie tienen enlaces químicos no completos, lo cual los hace más reactivos químicamente que el resto de átomos. Estos enlaces químicos son los causantes de que algunos materiales se oxiden con facilidad cuando se exponen al medio ambiente.

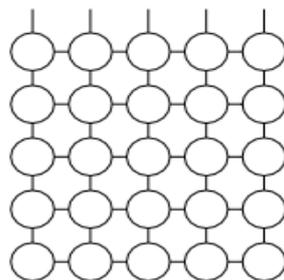


Figura 11. Enlaces incompletos en la superficie [26].

En cuanto a las fronteras de grano se les considera un defecto de la estructura cristalina debido a que causan la pérdida de la simetría en el ordenamiento de los átomos.

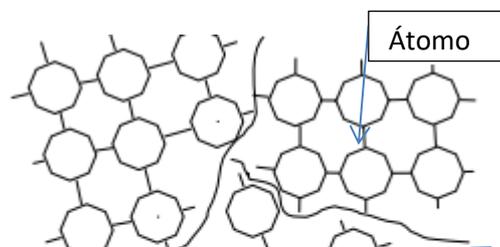


Figura 12. Límite de grano [26].

Los defectos que presenta la estructura cristalina de un material tienen un efecto directo en algunas propiedades del mismo. Los defectos puntuales hacen más difícil la deformación plástica de los metales y por lo tanto aumenta la resistencia mecánica. Anteriormente se describió el proceso mediante el cual se incrementa la resistencia a la deformación a causa del aumento en el número de dislocaciones en el interior del material a este endurecimiento se le llama endurecimiento por deformación plástica, por otro lado, el aumento que tengan los granos de un material también afecta a la resistencia del mismo material. Las fronteras de los granos son lugares donde la estructura cristalina ha perdido su simetría y es más difícil para una dislocación atravesar un límite de grano que dislocar el interior de un grano, esto se traduce a que si el límite de grano es pequeño el material presentará un aumento en la resistencia mecánica, por el contrario si el límite de grano es grande se facilitará la realización de dislocaciones y por lo tanto se traduce en una reducción de la resistencia mecánica [26].

3.2 Recuperación, recristalización y crecimiento de grano

El aumento de las dislocaciones y la deformación de los granos de la estructura cristalina pueden causar también cambios en las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión de los materiales. Todos los cambios asociados a la deformación plástica en frío pueden ser revertidos utilizando el tratamiento térmico apropiado. La restauración de las propiedades a los valores previos a la deformación se logra a partir de dos procesos diferentes que ocurren a temperaturas elevadas: La recuperación, recristalización y el crecimiento de grano.

3.2.1 Recuperación

Durante la recuperación, la energía interna obtenida por las deformaciones en la estructura cristalina del material, es liberada a causa del movimiento de las dislocaciones como resultado de la difusión atómica. Existe alguna reducción en el número de dislocaciones y la configuración de éstas cambia de modo que poseen bajas energías de deformación. Además, algunas propiedades físicas como la conductividad eléctrica y térmica se recuperan a los valores previos a la deformación [27].

3.2.2 Recristalización

Aun cuando la recuperación ha sido completada, los granos que forman la estructura cristalina todavía se encuentran en un estado de elevada deformación. La recristalización es la formación de un nuevo conjunto de granos libres de deformación con baja densidad de dislocaciones y característicos de la condición previa al trabajo en frío. La fuerza que produce esta nueva estructura de granos es la diferencia en la energía interna entre el material deformado y no deformado. Los granos nuevos se forman de un núcleo pequeño y crecen hasta que reemplazan completamente a los granos deformados originales. Durante la recristalización, las propiedades mecánicas que fueron modificadas como resultado del trabajo en frío son restauradas a sus valores previos a la deformación plástica, es decir, el metal se vuelve más suave, menos resistente y más dúctil. La recristalización es un proceso cuya extensión depende del tiempo y temperatura a la que es expuesto el material. El grado o fracción de recristalización aumenta con el tiempo al que el material está expuesto a la temperatura elevada. La recristalización de una aleación metálica específica algunas veces se define en términos de la temperatura de recristalización, la cual representa la temperatura a la cual el proceso de recristalización finaliza en 1 hora. Generalmente la temperatura de recristalización se encuentra entre un tercio y la mitad de la temperatura de fusión absoluta del metal o aleación, y depende de varios factores incluidos la cantidad de trabajo en frío y la pureza de la aleación. La recristalización ocurre más rápido en los metales puros que en las aleaciones, por lo tanto, al formar una aleación incrementa su temperatura de recristalización [27].

3.2.3 Crecimiento de grano

Después que la recristalización se ha completado, los granos libres de la deformación continuarán creciendo si el material se mantiene a la temperatura elevada. Este fenómeno se llama crecimiento de grano. El fenómeno del crecimiento de grano ocurre debido a que a medida que el grano crece, disminuye el área total de las fronteras de los granos (ver Figura 12), disminuyendo, por lo tanto, la energía total almacenada en el material [27].

CAPITULO 4 Marco referencial

4.1 Efectos de la composición química en la materia prima

Con respecto al material utilizado como materia prima para la fabricación de las persianas de Aluminio conocidos como *slats* y empleados en la empresa Spings Window Fashion, la composición química de este material consiste en su mayor parte de Aluminio (Al) y elementos de aleación como el magnesio (Mg), manganeso (Mn), hierro (Fe) y silicio (Si). En cuanto al Mg y al Mn, Fortini y col. [37] mencionan que son utilizados para elevar la resistencia a la tensión (UTS) y el esfuerzo de cedencia (YS), sin embargo, se ve disminuido el porcentaje de elongación (% EL). En su trabajo de investigación se analizó una aleación de aluminio del tipo A356 para estudiar cómo influía el Mg y el Mn en el comportamiento mecánico de dicha aleación. Los resultados que obtuvieron demostraron que para una aleación como material de llegada con un contenido de 0.25% de Mg e.p., se tenía un % EL del 14.2%, el UTS y YS fue de 295MPa y 205MPa respectivamente, cuando se añadió un mayor contenido de Mg a un 0.4% e.p., los valores del %EL fueron disminuyendo de 14.2% a 11.5% y de los %UTS y %YS sus valores aumentaron a 330MPa y 240MPa respectivamente. En cuanto al Mn en el mismo estudio, se modificó el contenido de Mn de 0.37% que posee el material original a 1.11% y sus resultados no mostraron un cambio significativo tal como ocurrió con el Mg. En otro estudio realizado por Grisha y Sharma [38], estudiaron la adición de Mg hasta en un 2% a una aleación Al-Cu y determinaron que la adición de Mg en un 1% favorecía a la aleación en cuestión en su resistencia a la tensión y dureza. Por otra parte, Kulkarni y Gurrappa [39], observaron en su estudio de una adición de Mg a una aleación de Al-Zn, que con un 2% de Mg promueve el refinamiento de grano, recordemos que el refinamiento o afino de grano conduce a elevar la resistencia mecánica del material. En otros estudios Ebenberger y col., [40] analizaron la variación del contenido de Mg para una aleación de aluminio del tipo 5182, disminuyendo el contenido de Mg del 4.16% al 3.60%, y mostraron que con un 63% de rolado en frío presenta una elongación de Lüder (las bandas de Lüder son unas bandas de deformación que aparecen en algunos metales con bajo carbono o algunas aleaciones de Al-Mg y estas pueden ayudar a saber dónde el material puede fallar, además de delimitar las regiones deformadas y no deformadas [41-42]) visible mientras que en un 20% de rolado en frío en las aleaciones no se muestra visible la elongación de Lüder, en otras palabras el límite elástico disminuye con las disminución

del Mg. Además de estudiar el comportamiento del Mg también observaron los cambios producidos por la variación en el contenido de Mn en 0.41%, 0.34% y 0.20% y determinaron que las aleaciones con un alto contenido en Mn presentan una resistencia para todas las combinaciones de grado de laminación y tratamientos térmicos además de que una aleación con pocas cantidades de Mn presenta una resistencia significativamente menor.

Morin [43], investigó el comportamiento de la adición de Mg en una aleación de aluminio 380 con un aumento de 0.06%, 0.30% y 0.55% y en las tres muestras observó que mientras incrementa la cantidad de Mg, aumenta la porosidad en el material después del tratamiento térmico aplicado. Por otra parte, Ouellet [44], analizó el efecto del Mg a una aleación de aluminio 319, observando que un incremento del 0,45% de Mg presenta un incremento en sus propiedades mecánicas en específico en el último esfuerzo a la tensión (UTS).

Taylor [45], por su parte, investigó el efecto de la adición de Fe a una aleación de Al-Si, menciona que el Fe en estas aleaciones, provoca la aparición de fases complejas que durante la solidificación pueden afectar negativamente las propiedades mecánicas, especialmente la ductilidad y con ello conducir a defectos en el material como la porosidad por contracción excesiva. Esa investigación indica que siempre que sea posible, los niveles de Fe en las aleaciones de Al-Si deben mantenerse tan bajos como sea posible para evitar efectos perjudiciales sobre las propiedades mecánicas, particularmente la ductilidad y la tendencia que presenta a provocar fracturas. Menciona que las adiciones de Mn se utilizan para neutralizar los efectos del Fe con una relación de Mn:Fe al 0.5.

4.2 Tratamientos térmicos de recocido

Muchas investigaciones se han llevado a cabo para estudiar el comportamiento mecánico de las aleaciones de aluminio cuando son sometidas a diferentes tipos de tratamientos térmicos. Jinlian y col., [46], estudiaron la adición de tierras raras en una aleación de aluminio del tipo 5052 y tratadas térmicamente, mencionan que el tratamiento térmico de recocido para las aleaciones de aluminio 5052 con adición de tierras raras mejoran el porcentaje de elongación de la aleación.

Wang y col., [47], indicaron en su estudio que debido al tratamiento térmico de recocido la microestructura de una aleación de Al 5052 previamente rolada en frío no modifica la morfología de los granos, sin embargo, estos empezaron a tener un crecimiento debido al tratamiento térmico de recocido a temperaturas de 220°C, 250°C, 300°C, 350°C, 380°C con un tiempo de permanencia de 4h, además de la aparición de compuestos intermetálicos en la aleación. También como menciona Liu y Morris [48], se presenta una disminución de las propiedades mecánicas de dureza, pero aumenta en el porcentaje de elongación en una aleación de Al 5052, y un tratamiento de recocido a 573°K, 673°K y 773°K.

4.3 Efecto de la temperatura de recocido

El efecto de la temperatura de recocido, como se mencionó anteriormente en el proceso de recocido, mejora el porcentaje de elongación de una aleación de aluminio 5052 con tierras raras. En este apartado se hace referencia a la influencia del tiempo y la temperatura con dichos tratamientos térmicos. Zhang y col., [49], estudiaron la interacción que tiene la temperatura de recocido con las propiedades mecánicas. Como se observa en la Figura 13, a medida que incrementa la temperatura del tratamiento térmico de recocido disminuye la dureza del material, superior a 300°C se aprecia el mayor decremento en la dureza.

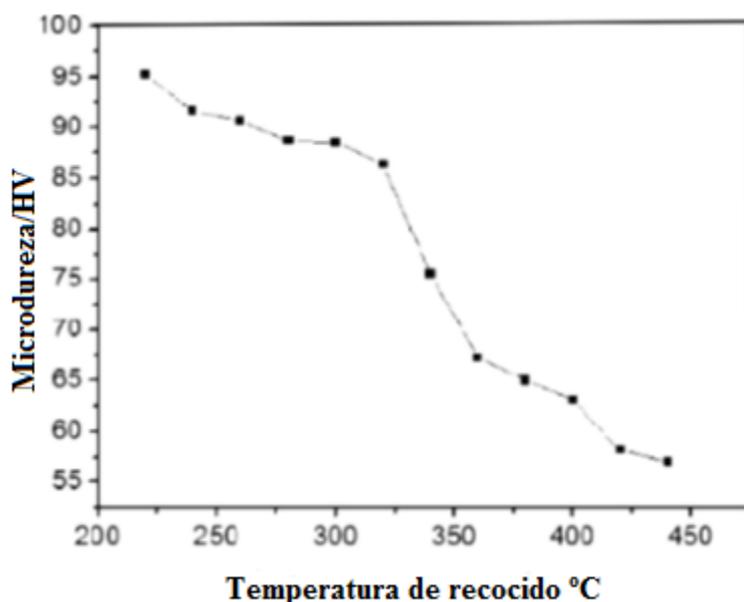


Figura 13. Relación de la microdureza y temperatura de recocido en una aleación de Al 5052 [49].

Otro de los efectos que presenta la temperatura en los tratamientos de recocido es la modificación en el tamaño de grano final. Wang y col., [47], estudiaron este efecto en una aleación de aluminio del tipo 5052 después de una deformación de un 75% de rolado. La Figura 14, muestra cómo del estado de rolado con este porcentaje de deformación y un tamaño de grano inicial de 424 μm , se modifica después del tratamiento térmico de recocido. Las muestras estudiadas, presentaron un crecimiento de grano de 432, 444, 480, 496 y por último 516 μm después de someterse a un tratamiento térmico a 380°C durante un periodo de 4 horas en intervalos de 1 hora.

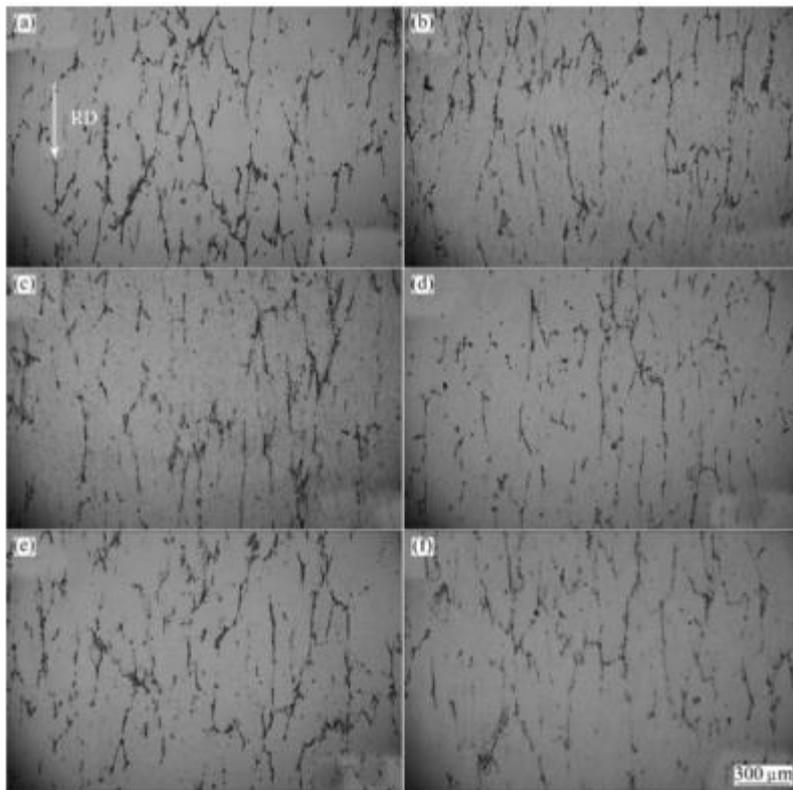


Figura 14. Micrografías de una aleación de Al 5052 rolada al 75% con tratamiento térmico de recocido por 4 horas: (a) Sin tratamiento térmico, (b) 220 °C, (c) 250 °C, (d) 300 °C, (e) 350 °C y (f) 380 °C [47]

Liu y Morris [48], estudiaron una aleación de Al 5052 obtenida por fundición, a la cual se le aplicó una deformación del 70%, 80% y 90% posterior para obtener una recristalización de los granos. Se utilizó un tratamiento térmico de recocido a 673K durante un tiempo de 1000 seg, adicional a esto, se realizaron mediciones de microdureza a estos porcentajes de deformación, pero a diferentes temperaturas de recocido las cuales fueron 573K, 673K y 773K para observar su comportamiento. En la Figura 15, se puede observar que la temperatura de recocido más alta conduce a una recristalización más

temprana con el tratamiento térmico, el tiempo de inicio de la recrystalización de la aleación de Al 5052 en colada continua y colada dinámica a 573°K, comenzó a los 1000 seg y aproximadamente a los 60 segundos con una temperatura de 773°K. El material presentó una disminución en su microdureza dependiendo del grado de deformación en frío presente en la muestra. Como se aprecia en la Figura 15, la muestra con mayor deformación tiende a tener una mayor ductilidad a menor tiempo y conforme la deformación sea menor se retarda el tratamiento térmico de recocido en la ductilidad al material.

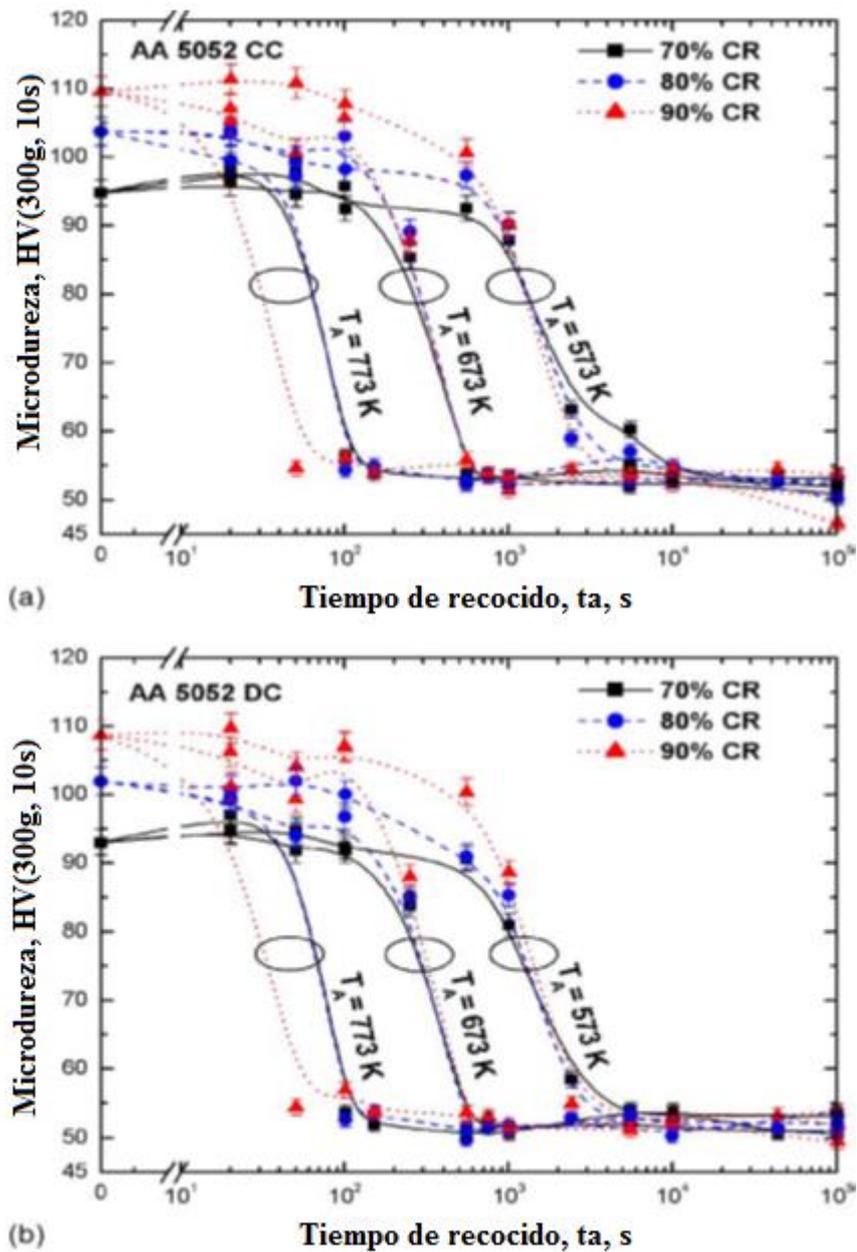


Figura 15. Efecto del tiempo de recocido sobre la microdureza para una aleación de Al 5052 rolada en frío con 70%, 80%, y 90% de reducción:(a) Colada Continua and (b) Colada Dinámica con unas temperaturas de 573°K, 673°K y 773°K. [48]

De la misma manera, Zhang y col. [49], realizaron un estudio en una aleación de aluminio 5052 y una aleación modificada de aluminio 5052 con tierras raras, sometieron las muestras a un tratamiento térmico de recocido a temperaturas de 475°C, 500°C, 530°C, 560°C y 575°C con tiempos de permanencia de 6, 12 y 30 horas. Se utilizaron dos formas de enfriamiento, la primera dentro del horno y la otra a temperatura ambiente. En sus resultados muestran, que mientras la temperatura incrementa disminuye la dureza del material, cuando el material alcanza los 560°C la magnitud de dureza disminuye como se muestra en la Figura 16.

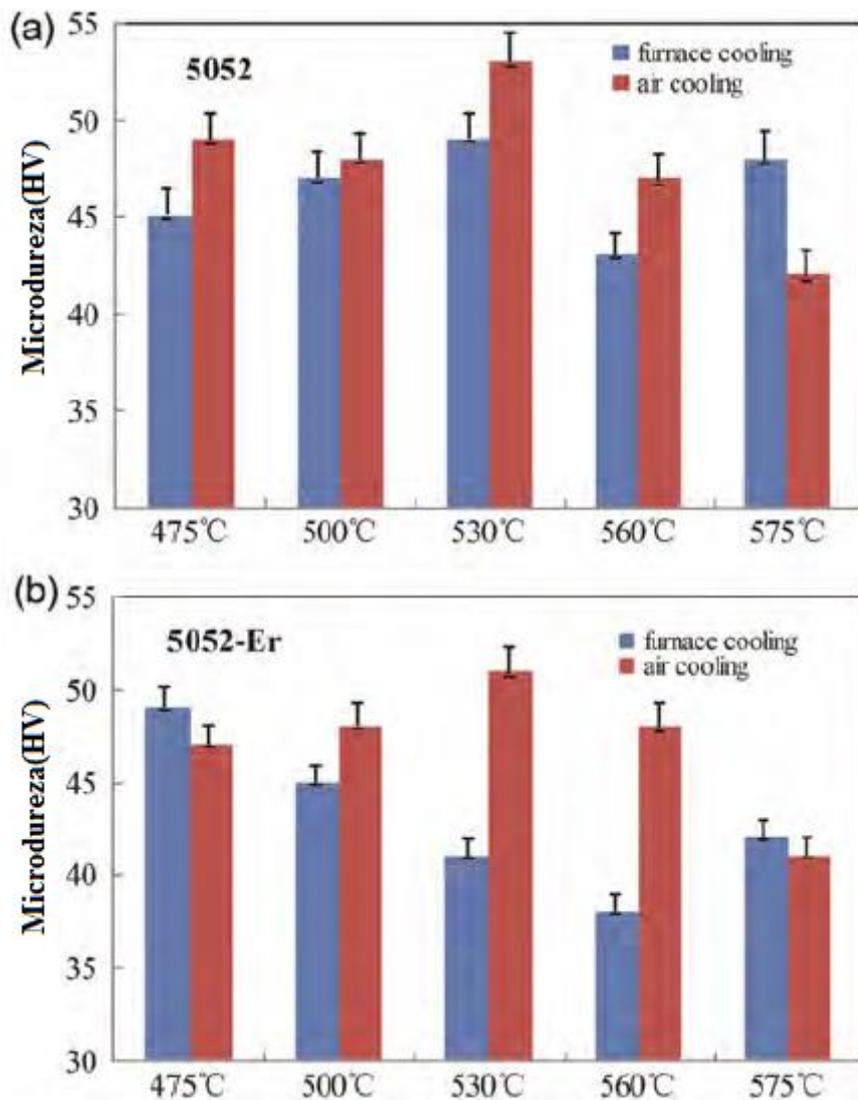


Figura 16. Microdureza de una aleación de a) aluminio 5052 y b) 5052 + Er, recocida a diferentes temperaturas por 30h [49].

En otros estudios Guo y col. [50], realizaron un estudio acerca del efecto que tienen las condiciones de recocido en la recristalización de una aleación de aluminio 5182, utilizando temperaturas de tratamiento de 350°C, 400°C, 450°C y 500°C con tiempos de permanencia de 1 min a diferentes velocidades de calentamiento, 50°C/hr y 30°C/hr. Antes de analizar las muestras de aluminio se le realizó una reducción del 75% y un recocido a diferentes temperaturas. En la Figura 17, se observa el comportamiento del material a diferentes temperaturas, teniendo como resultado una recuperación a las temperaturas de 220°C y 235°C con un tiempo de 48 hrs, las cuales tuvieron el mejor comportamiento de recuperación de la muestra a las temperaturas estudiadas.

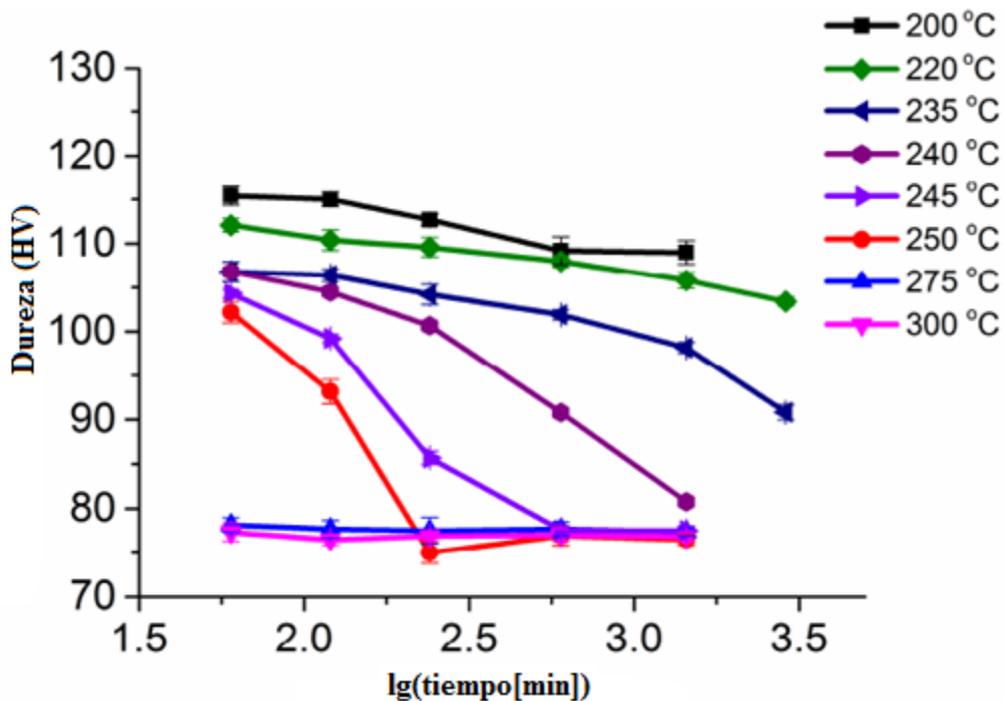


Figura 17. Variación de la dureza en base al tiempo de envejecimiento para muestras recocidas isotérmicamente [50]

Este tratamiento de recuperación se utilizó para realizar el tratamiento posterior de recocido a las temperaturas y velocidades de calentamiento ya antes mencionadas. En la Figura 18, se muestra cómo evoluciona el tamaño de grano con las diferentes temperaturas de recocido a diferentes tiempos de calentamiento y con recuperación de pre-recocido. Teniendo un efecto de crecimiento de grano muy marcado en el salto de temperatura de 450°C a 500°C, generando unos tamaños de grano de entre 11 y 12 micras.

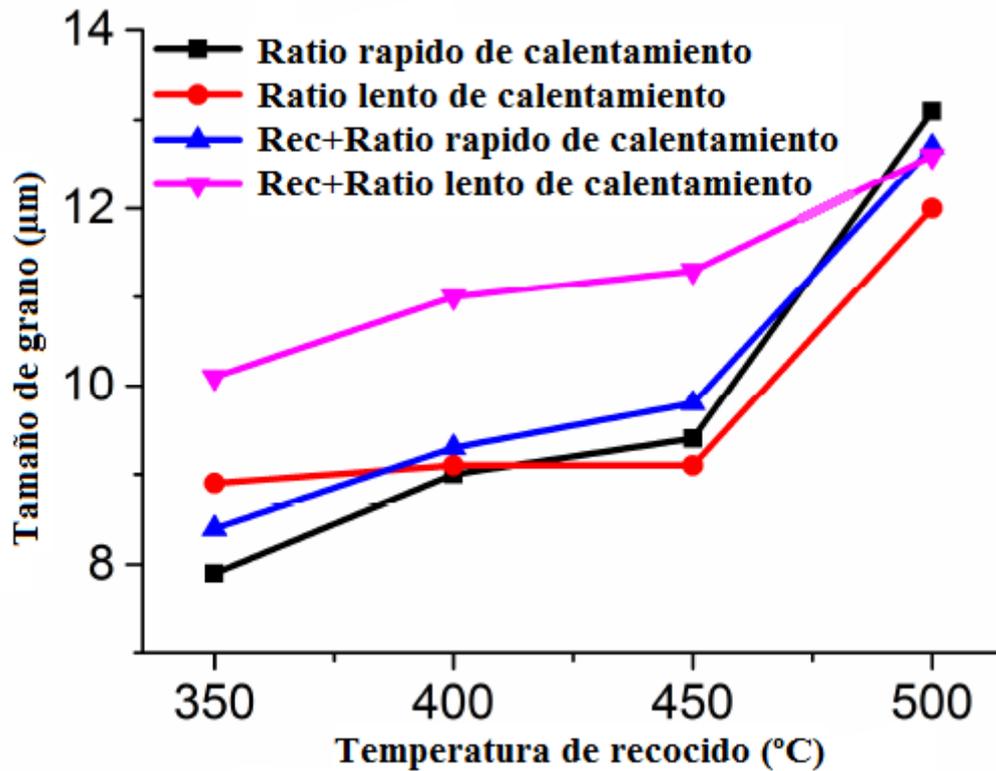


Figura 18. Comparación de los tamaños de grano con las diferentes condiciones de recocido [50]

En otros estudios Zhang y col. [51], realizaron una investigación de la influencia en la velocidad de enfriamiento del material después de recibir un tratamiento térmico, y determinaron que este factor está relacionado con las propiedades mecánicas del material, puntualizan que a medida que incrementa la velocidad de enfriamiento, la dureza del material también aumenta, debido a un refinamiento de la microestructura del material. Además, Galán [52] indica que el enfriamiento después del proceso de recocido no afecta en gran medida a los materiales, pudiéndose llevar a cabo el enfriamiento al aire, más sin embargo, las aleaciones de Al-Mg, el enfriamiento después de una recristalización del material es muy rápida, donde el Mg tiende a precipitar en los límites de grano, ocasionando que el material sea más sensible a la corrosión, este inconveniente ocurre con mayor frecuencia en las aleaciones con una concentración de Mg de 4.5% o mayores.

4.4 Evolución de tamaño de grano

Como se explicó anteriormente cuando un metal fundido empieza su proceso de solidificación, los átomos comienzan a formar una red cristalina en los puntos donde se está solidificando formando cristales, a dichos cristales se les conoce como granos. En el estudio de Kim y col. [53], se analizó una aleación de aluminio 5052 con diferentes tipos de rolado, el rolado normal y el *clock-rolled*, seguidos de un tratamiento térmico de recocido a 500°C y los resultados obtenidos se presentan en la Figura 19. Como se puede observar en la Figura 19, se muestra que el tamaño de grano creció de una manera heterogénea y en la Figura 19b, muestra como el tamaño de grano creció de una manera más uniforme con respecto a la Figura 19a.

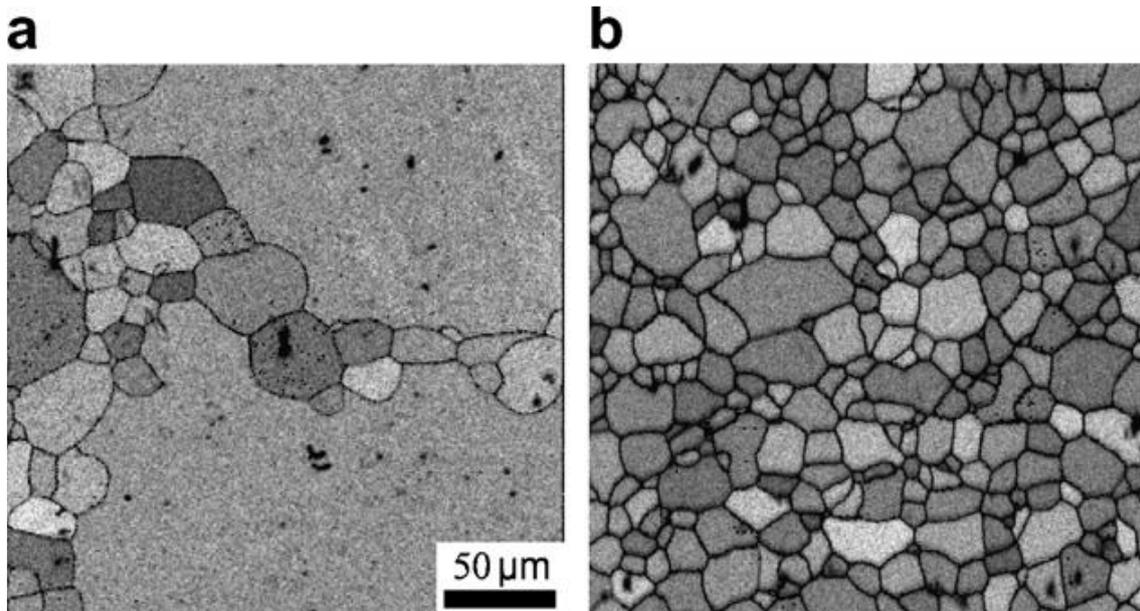


Figura 19. Microestructura de una aleación de Al 5052 recocida a 500°C por 1h: a) Rolada normalmente y b) Rolado de reloj (*clock-Rolled*) [53].

Además de eso, el autor investigó cómo evolucionaba el grano con un tratamiento térmico de recocido a 500°C con tiempos de, 10, 15, 25, 30, 40 minutos y la evolución del grano se puede apreciar en la Figura 20.

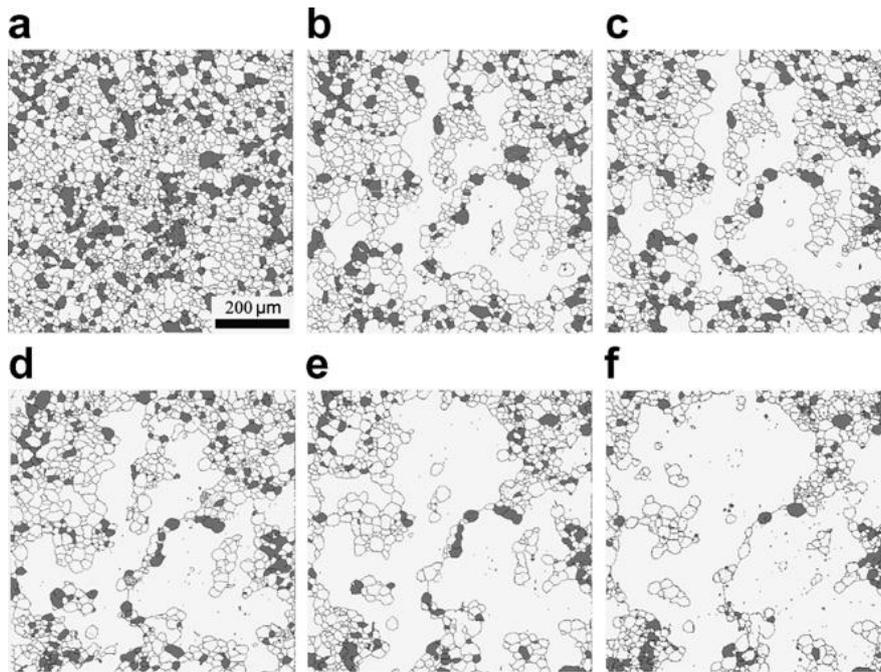


Figura 20. Desarrollo de microestructuras en la muestra con textura de recristalización cubica durante el recocido de 500°C por (a) 0 min, (b) 10 min, (c) 15 min, (d) 25 min, (e) 30 min and (f) 40 min. Granos en gris están orientados en textura cubica [53].

Por otra parte, Suk y col. [54], analizaron una aleación de aluminio 5182 a la cual se le realizó una reducción de 6.5mm a 1mm de espesor (un 85% de reducción), seguido de un tratamiento térmico de recocido entre 400°C y 560°C con la finalidad de evaluar la evolución de la microestructura del material.

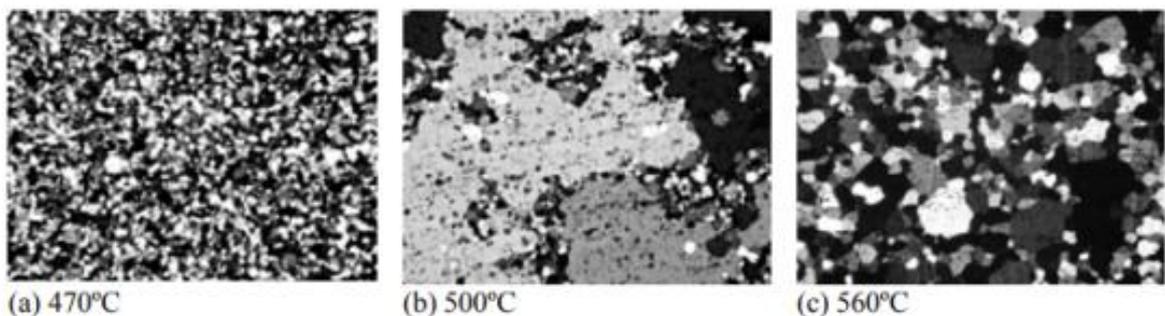


Figura 21. Evolución de las microestructuras después de un recocido isócrono durante 1h a diferentes temperaturas [54]

La Figura 21, muestra la evolución del tamaño de grano con respecto a la temperatura de tratamiento térmico de recocido a un tiempo de 1 hr. En este estudio se demostró que el tamaño de grano depende en gran medida de la temperatura de recocido siendo el punto de partida donde comenzó el crecimiento del grano a 470°C y un crecimiento anormal de grano a partir de 480°C hasta 560°C. Por otra parte, Radetic y col. [55], estudiaron la

influencia del rolado en frío y la temperatura de recocido en el crecimiento anormal de los granos, en una aleación de Al 5182. Las temperaturas de tratamiento térmico utilizado fueron a, 350°C, 400°C, 440°C, 470°C, 480°C, 500°C y 520°C con un tiempo de permanencia de 1 hr. Adicionalmente, evaluaron un tratamiento térmico de recocido isotérmico a 480°C con diferentes tiempos de permanencia; 5, 15, 30, 45, 60, 180 min, con reducciones entre 40-85%. Demostraron, que además de la temperatura de recocido, un parámetro que influye de manera significativa sobre el crecimiento anormal de los granos, es el grado de deformación del material, como se muestra en la Figura 22. Se muestra con un círculo en blanco y negro y líneas punteadas el inicio del crecimiento anormal de grano, y como se puede apreciar éste va disminuyendo en función de la temperatura.

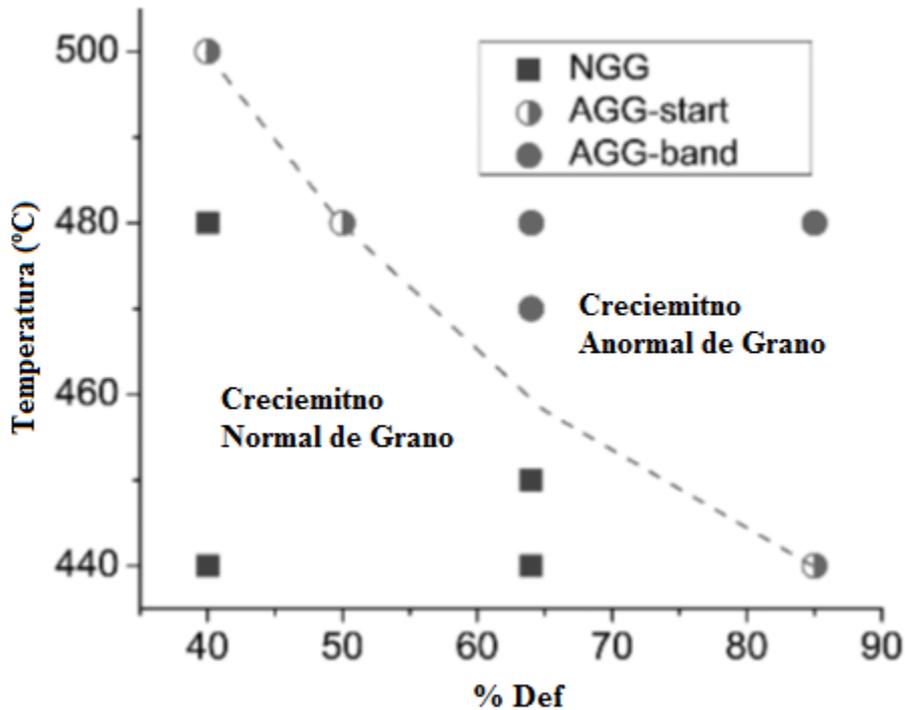


Figura 22. Efecto de la temperatura de recocido y el grado de reducción en la microestructura del grano y la aparición de granos anormalmente grandes [55]

En cuanto a las mediciones del tamaño de granos con crecimiento anormal, se presentó a temperaturas de 470°C y 480°C, con un incremento en el diámetro del grano de 443 a 743 μm , pero en las temperaturas de 500°C a 520°C comenzó a disminuir el tamaño disminuyendo de los 743 μm en 480°C a 703 μm en 500°C y 435 μm en 520°C.

Además, como se aprecia en la Figura 23, se muestra el comportamiento del crecimiento de grano a una temperatura de recocido de 480°C con un tiempo de permanencia de 1 hr con 40%, 50%, 64% y 85% de reducción. En la Figura 21a, se muestra una microestructura equiaxial sin mostrar ningún grano de tamaño anormal deformado 40%, en la Figura 21b, para una deformación del 50%, comienza a aparecer el crecimiento anormal de grano, para un 64% de deformación se muestra en su mayoría en la microestructura granos anormales de gran tamaño ver Figura 21c, y en la Figura 21d, con el 85% de deformación presenta una microestructura de granos anormalmente grandes. Por lo tanto, se puede mencionar, que el incremento en la temperatura en este caso, presenta una influencia directa sobre el crecimiento anormal del grano durante la recristalización.

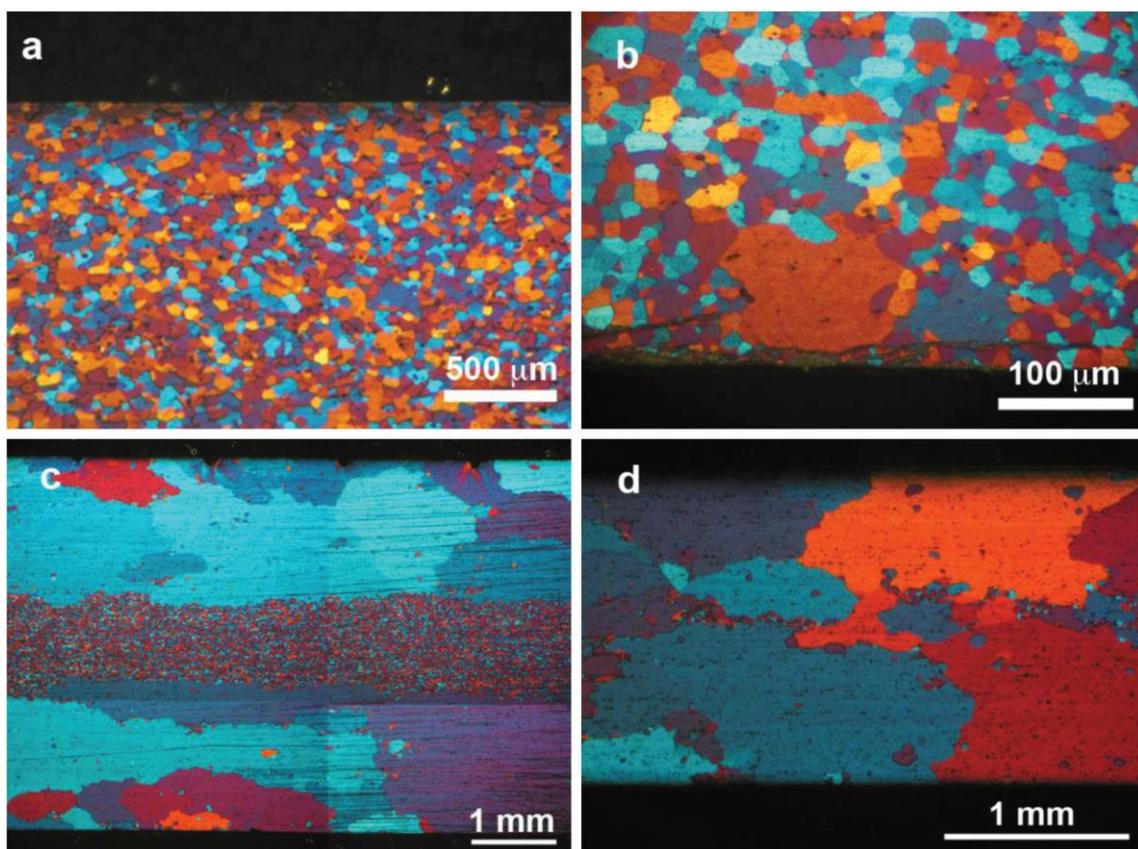


Figura 23. Efecto del % de reducción en el crecimiento de grano durante el recocido de 480°C a 1h; a)40%; b)50%; c)64% y d)85% [55]

En otros estudios Li y col. [56], concuerdan con Radetic, donde menciona que la temperatura de calentamiento y el trabajo en frío tienen una influencia en la presencia de granos anormalmente grandes, mostrando en su estudio granos de crecimiento anormal

presentado en tubos de extrusión multipuerto de una aleación Al 3102. Las condiciones del estudio fueron reducciones del 1%, 3%, 5% y 10%, con un tratamiento térmico de recocido de 600°C con diferentes tiempos de permanencia que oscilan entre 15 a 180 segundos y se observó que con una reducción del 10% los granos anormalmente grandes aparecen con mayor rapidez, aunque, con una reducción del 3% los granos toman un mayor tamaño a comparación de un porcentaje de deformación mayor. En cuanto a las propiedades mecánicas la aparición de este crecimiento anormal de grano presenta un problema para este tipo de tubos ya que reduce en gran medida la dureza del material, reduciendo en el caso de 3% a 73 MPa aproximadamente con un recocido de 600°C a 180 seg. Y en el caso de 5% de reducción presento 79 MPa. Por otra parte, Beck y Sperry [57] indican que el crecimiento anormal de los granos se puede desencadenar debido a que el material sea anisotrópico (indica que el material no tiene distribuidas uniformemente las propiedades mecánicas en el material) y se relaciona con el límite de desorientación.

4.5 Análisis de las propiedades mecánicas

Como se menciona en los apartados anteriores una de las formas para mejorar las propiedades mecánicas de un material es mediante tratamientos térmicos, entre los que se encuentra el tratamiento de recocido. Jinlian, Wang, Liu y Zhang [46-49], han demostrado en sus trabajos que el tratamiento de recocido disminuye la dureza del material haciéndolo más dúctil, lo que se traduciría a una mejor maquinabilidad y menor resistencia en darle la forma a una pieza o componente, ya sea, reducir su espesor, doblarlo de ciertas formas, etc. Así mismo, Entezam y Honarpisheh [58], realizaron un análisis enfocándose en la dureza de una aleación de aluminio 5052, a la cual se le realizó un ECAR (Rolado Angular de Canal Igualado) para mejorar la dureza del material, en cuanto al material de llegada sin realizarse el ECAR el material presentó una dureza Vickers de 62 HV de llegada y al momento de realizar el proceso la primera vez presentó un aumento en su dureza elevándose a 83 HV de ahí al momento de realizarle la segunda tercera, cuarta y quinta pasada no presentó un cambio muy notorio oscilando la dureza de: 83-89 HV.

4.6 Formación de compuestos intermetálicos

Maffia [59], demostró que en una curva de solvus ideal para el endurecimiento por precipitación, hay una cierta dificultad en la nucleación de la fase Al_3Mg_2 , lo cual ha

impedido la comercialización de las aleaciones de aluminio-magnesio tratables térmicamente, a menos que contengan silicio en modo suficiente, cobre, o zinc para formar precipitados de Mg_2Si , Al-Cu-Mg o Al-Zn-Mg. Esto es para las aleaciones de la serie 5xxx.

En otros estudios Unfried-Silgado y col. [60], estudiaron el efecto de los tratamientos isotérmicos sobre el tamaño de grano y la dureza de aleaciones de aluminio AA5083-H116, encontrando la presencia de compuestos intermetálicos del tipo $Al_6(Mn, Fe)$, los cuales pueden causar una disminución en las propiedades mecánicas del material ocasionando una pérdida importante en la dureza.

Capítulo 5. Procedimiento experimental

5.1 Proceso SANI

El proceso SANI consiste en darle forma a la materia prima (*coils* de aluminio) en las tablillas (*slats*) que conformaran la persiana de aluminio, además de hacerle un pequeño orificio a las tablillas de aluminio llamado ponchado en el cual se introduce unos hilos en forma de escalera llamado escalerilla todo esto se utilizará para el proceso siguiente que es ensamble, en donde quedará completamente ensamblada la persiana veneciana.

Al proceso de SANI también llamado de corte y ponche de tablillas se le han realizado varios cambios para incrementar la producción de persianas por lo que la productividad ha sido afectada positivamente, pero con este alto mejoramiento en la productividad también se presentó un incremento en el *scrap* o desperdicio.

5.1.1 Máquina SANI

Es una máquina semiautomática la cual desempeña una fracción del ciclo de trabajo bajo un programa de control, el operador atiende la máquina para restablecer dicho ciclo esto para que el operador pueda controlar el proceso si se llegase a presentar algún desperfecto en la pieza. Esta máquina es llamada así por su fabricante y cuenta con dos generaciones diferentes de máquinas, las SANI Convencionales y las Súper SANI, ambas son utilizadas para el mismo proceso en las tablillas de aluminio (*slats*) las cuales son el cuerpo principal de la persiana. Las tablillas son producidas en un rollo de lámina de aluminio de 1" y ½" pulgada de ancho las cuales tienen espesores de 0.008" y 0.006", y son pasados a través de una serie de rodillos, dándoles la forma de corona necesaria para proporcionarle cierta firmeza a la tablilla una vez cortada y ponchada, permitiendo que dicha tablilla no sufra cambios una vez montada en la persiana de forma horizontal. [5].

Este equipo se compone de: un rodillo en el cual se coloca la materia prima el cual se conoce como *payoff* o unidad de desenrollo, dos rodillos de alimentación uno de acero D2 y el otro de uretano (polímero), dos rodillos fijos de plástico, dos buffers de alimentación, apartado de formado el cual se compone de 2 rodillos con una perilla para apretar o aflojar que forman la corona y dos sostenedores de la materia prima, estas partes son mostradas en las Figuras 24 y 25.



Rodillos de alimentación
D2 y uretano

Rodillos fijos de
plástico

Figura 24. Máquina SANI

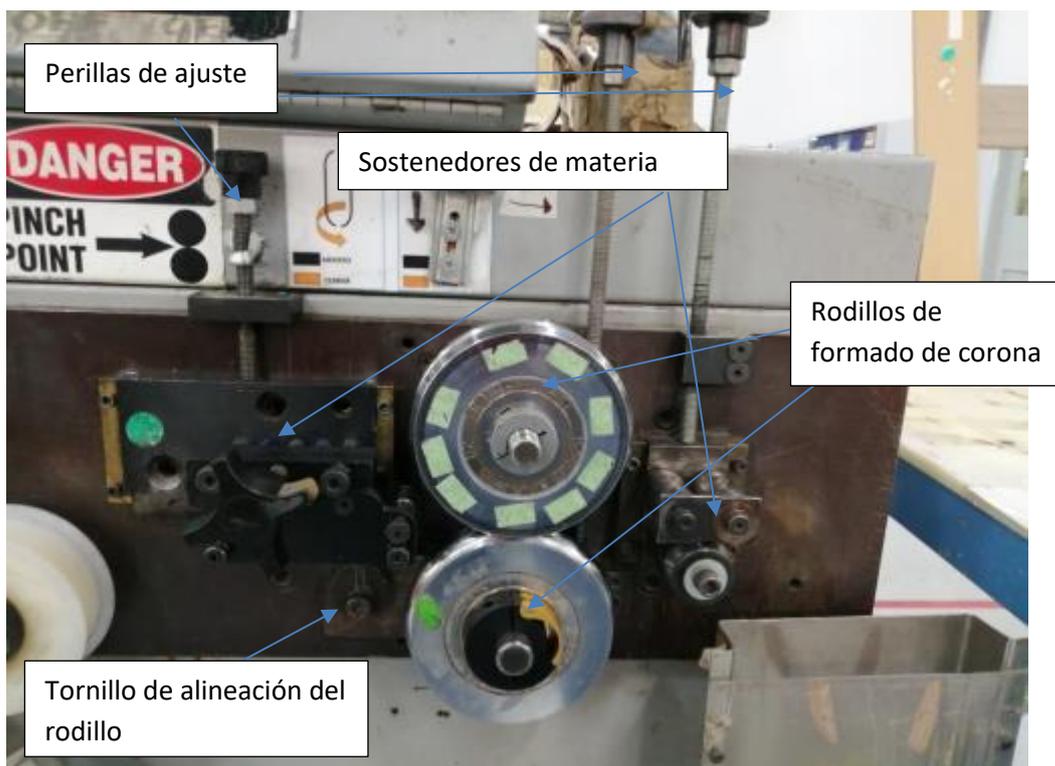


Figura 25. Apartado de formado

El rodillo de materia prima o *payoff*, tiene como función sostener la materia prima para alimentar a la máquina, los rodillos fijos de plástico se encargan simplemente de guía para la materia prima, los rodillos de alimentación alimentan al buffer de alimentación.

el rodillo de acero D2 es el que rota para transportar la materia prima hacia el buffer y el rodillo de uretano es un apoyo para sostener la materia prima y que no se salga de la máquina. Los Buffers de alimentación se encargan de almacenar materia prima para que la máquina SANI no esté en constante uso para no dañar la materia prima y el proceso sea pausado, además de que ayuda a que la máquina se detenga debido a que cuenta con sensores que detienen la máquina cuando ésta se queda sin materia prima. Mientras que el apartado de formado se compone de tres partes que se relacionan entre sí y un tornillo de alineación de los rodillos que su función es como su nombre lo indica es para darle la alineación a los rodillos, para que el slat de aluminio entre de manera centrada a los rodillos que le darán la corona y no produzca anomalías en el formado de las tablillas de la persiana.

Los sujetadores de la materia prima se encargan de introducir la materia prima en los rodillos de formado y son los causantes de darle la rectitud al slat de la persiana, a su vez los rodillos de formado son los que se encargan de darle la corona al *slat*. Dicha corona sirve para que el slat mantenga su forma recta suspendido por los hilos de la persiana [61].

5.1.2 Herramientas de la máquina

Las herramientas de la máquina SANI, las cuales ayudan a formar las tablillas de las persianas están compuestas de un polímero llamado uretano, el cual ayuda a realizar el borrado de la memoria del material de las láminas de aluminio, además, existe otra herramienta en la máquina SANI la cual ayuda al material a darle una forma cóncava a las láminas de aluminio, dichas herramientas están compuestas de una aleación de acero conocido como Acero D2.

5.2 Análisis de la composición química

Para determinar la composición química de los *slats* de aluminio, primero se realizó un corte en las tiras de por lo menos 10 cm de longitud, fue retirado el recubrimiento de pintura para no alterar los resultados de la prueba, la longitud de la muestra es debido a que la muestra es demasiado delgada, por lo que se le tuvo que realizar varios dobleces

para poder realizar la prueba, el equipo utilizado fue un espectro de visión óptico por chispa para lo cual se utilizó un equipo marca SPECTRO modelo LAB S.

5.3 Tratamientos térmicos

Para mejorar las propiedades mecánicas del material se realizó un tratamiento térmico de recocido. El recocido, consistió en una serie de ciclos de calentamiento, tiempos de permanencia y enfriamientos bajo diferentes condiciones de operación (ver Figura 26), con el objetivo de evaluar las propiedades finales del material y encontrar los parámetros ideales para el procesamiento. Los resultados obtenidos son mostrados en las Figuras 35 a la 43 en intervalos de tiempo y temperatura; temperaturas de 450°C, 500°C y 550°C y en cuanto a los intervalos de tiempo 30, 60, 120 minutos. Posterior al tratamiento se enfrió la muestra con agua fría.

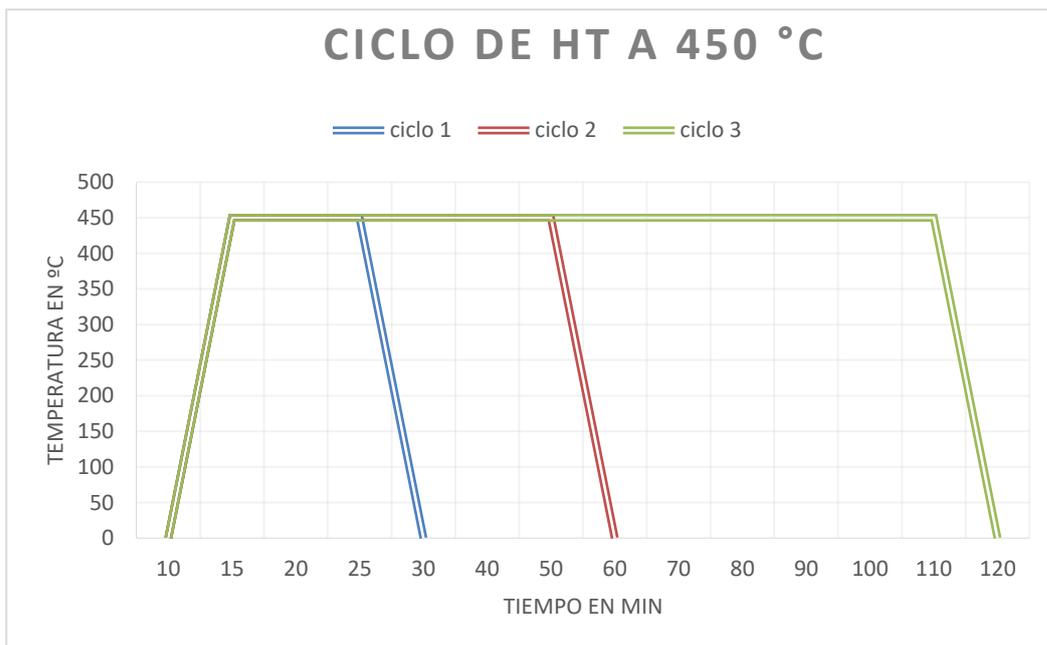


Figura 26. Grafica de ciclos de calentamiento

5.4 Preparación metalográfica

Para la preparación metalográfica las piezas se tuvieron que montar en una resina llamada “baquelita” debido a que el material es excesivamente delgado y así poder manipular su manejo, mientras que para el desbaste de las piezas se utilizaron lijas de carburo de silicio con diferentes granulometrías desde la 500, 800 y 1200 granos/in². Para el proceso de

pulido se utilizaron 3 paños a los cuales 2 se les colocó pasta de diamante de 3 y 1 micras respectivamente y al último paño se le colocó sílica coloidal de 0.5 micras.

Para la obtención de imágenes se utilizó un microscopio marca KEYENCE VH-Z500R, además de un microscopio óptico marca OLYMPUS VANOX AHMT3. Para la revelación de la microestructura de las muestras se utilizaron los reactivos, keller, week, barker, solución de H_3PO_4 al 10%, ataque electrolítico, solución de HF al 1%, 5% y 10%, solución de HNO_3 al 10%, Nital y solución de NaOH al 1%.

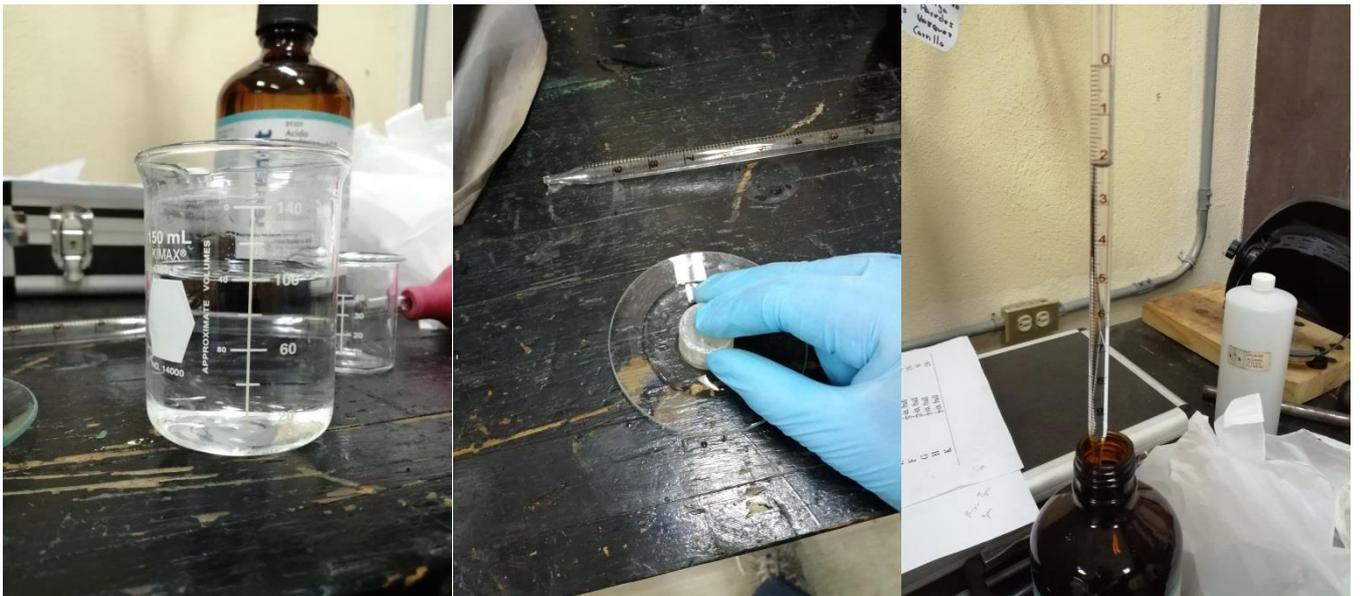


Figura 27. Prueba de reactivos

Pero el ataque químico con el mejor resultado en la revelación de la microestructura fue un ataque químico con una solución de NaOH al 1% con una permanencia en la solución de 10 minutos por muestra.

El procedimiento que se realizó para poder revelar la microestructura de los *slats* de aluminio fue el siguiente: primero se montaron en una resina de baquelita las muestras de los *slats* para facilitar su manejo y producir una superficie plana evitando bordes, para esto se utilizó la norma E3 ver Figura 28 [62].



Figura 28. Piezas montadas en baquelita

Una vez montadas las piezas en la baquelita se procedió a marcar las piezas para su identificación posterior. Después se prosiguió con el proceso de desbaste en el cual se utilizaron las lijas de carburo de silicio con una granulometría de 500 granos/ in^2 a 1200 granos/ in^2 a una velocidad de entre 200 a 250 rpm.



Figura 29. Máquina para desbaste

Una vez terminado el desbaste, se continuo con aplicar un pulido de las piezas, para esto se utilizó pasta de diamante de 3 y 1 micras, después del pulido con pasta se utilizó sílica coloidal de 0.5 micras para el pulido final. Una vez terminado el pulido se debe de comprobar que no exista daño por el desbaste, corte, arañazos, deformaciones y esmerilado. Se pueden tolerar arañazos con un grosor máximo de 1 μm según la norma E3. Después del pulido se debe limpiar y secar cuidadosamente para evitar daños a la muestra [62].



Figura 30. Máquina de pulido

Seguido del pulido final se procedió al ataque químico del material, con el reactivo químico que ofreció mejores resultados en revelar la microestructura de las muestras de los *slats* de aluminio.

5.5 Caracterización y análisis de imágenes mediante Imagepro

En la caracterización de la microestructura, fases y tamaño de grano, se utilizaron imágenes obtenidas mediante microscopía óptica, utilizando un microscopio metalográfico marca KEYENCE VH-Z500R, con un aumento de 500x y escala de 50 μm .



Figura 31. Microscopio KEYENCE VH-Z500R

Para determinar el crecimiento en el tamaño de grano posterior al tratamiento de recocido, se utilizó el software de computadora Imagepro-plus, mediante dicho software se analizan las imágenes obtenidas en el microscopio óptico KEYENCE, ver Figura 32. La caracterización del tamaño de grano se llevó a cabo de acuerdo a la norma *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis* [62]. El primer paso, es calibrar la imagen en el sistema y seleccionar la unidad de medida en este caso micrómetros (μm).

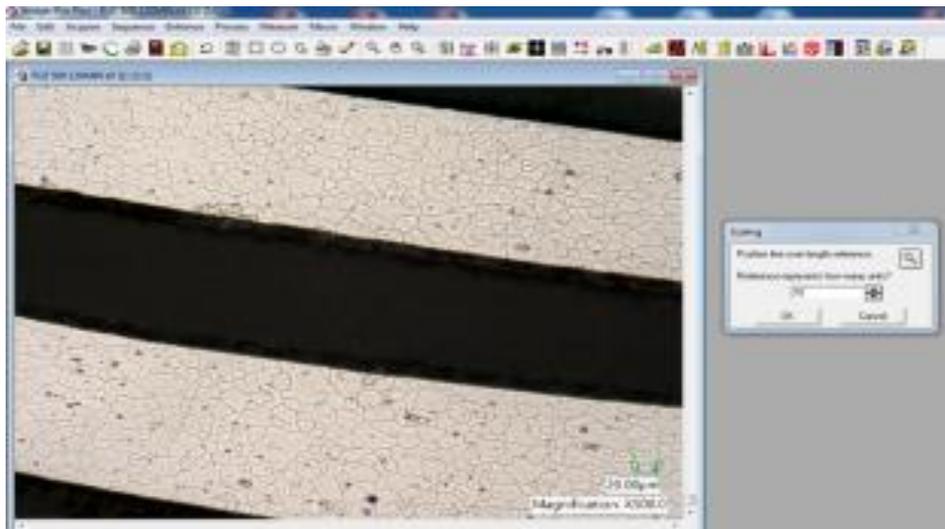


Figura 32. Calibración del software imagepro

Una vez calibrado la imagen con el programa, se procede a realizar las mediciones de los granos del material como se muestra en la Figura 33. El método utilizado para la obtención de las medidas de tamaño de grano fue la medición del diámetro de grano y después obtener un promedio a los resultados de acuerdo a la norma [62]. Para contar con resultados confiables, se deben de efectuar por lo menos 50 mediciones en adelante, a lo cual se procedió a realizar 200 mediciones a las muestras de la materia prima de los proveedores tratadas térmicamente.

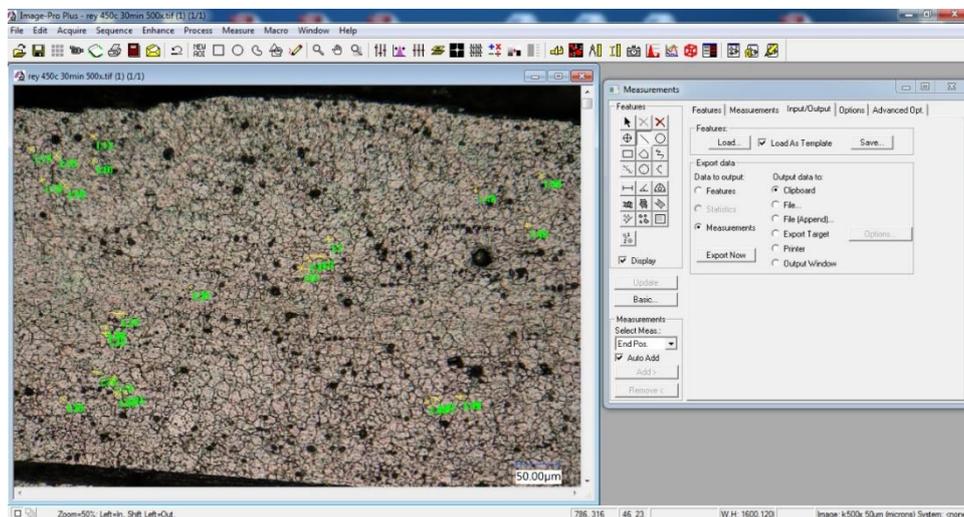


Figura 33. Medición de tamaño de grano en el software imagepro

5.6 Pruebas de dureza

Una de las formas más comunes de determinar la dureza de las aleaciones de Al es mediante una prueba conocida como Microdureza Vickers, esta prueba consiste en realizar una huella con un microscopio especial (Figura 34) con una carga de peso, dicha huella es en forma de rombo la cual se medirán las diagonales de esquina a esquina. Los ensayos de microdureza se llevaron a cabo en un microdurometro marca WILSON 300FM/10kg (Wilson Instruments®, Binghamton, NY, USA), con el cual se analizó la dureza de las muestras, se separaron las muestras por temperatura y tiempo, en total se analizaron 9 muestras, a las cuales se les realizaron 10 huellas de indentación con una carga de 100 gf por un tiempo de 12 s a cada muestra, posteriormente se promediaron los datos. Para obtener el valor de la prueba Vickers, se debe multiplicar un valor fijo por la carga y dividirlo entre el promedio de las diagonales elevada al cuadrado y con ello encontramos el resultado de la prueba ($Hv = 18544P/d^2$).

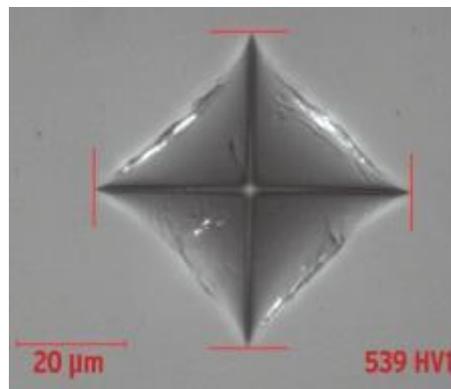


Figura 34. Huella de Microdureza Vickers.



Figura 35. Microdurometro Wilson 300FM

5.7 Prueba del Microscopio Electrónico de Barrido

Para determinar la composición química de las fases presentes en las muestras estudiadas, además de obtener imágenes de alta calidad se utilizó un microscopio electrónico de barrido marca PHILIPS XL30 ESEM equipado con un sistema de microanálisis de la marca EDS EDAX modelo PEGASUS (*Pegasus Scientific Inc. Rockville, MD, USA*), para observar los diferentes compuestos intermetálicos que estaban presentes en cada muestra de los 3 proveedores.

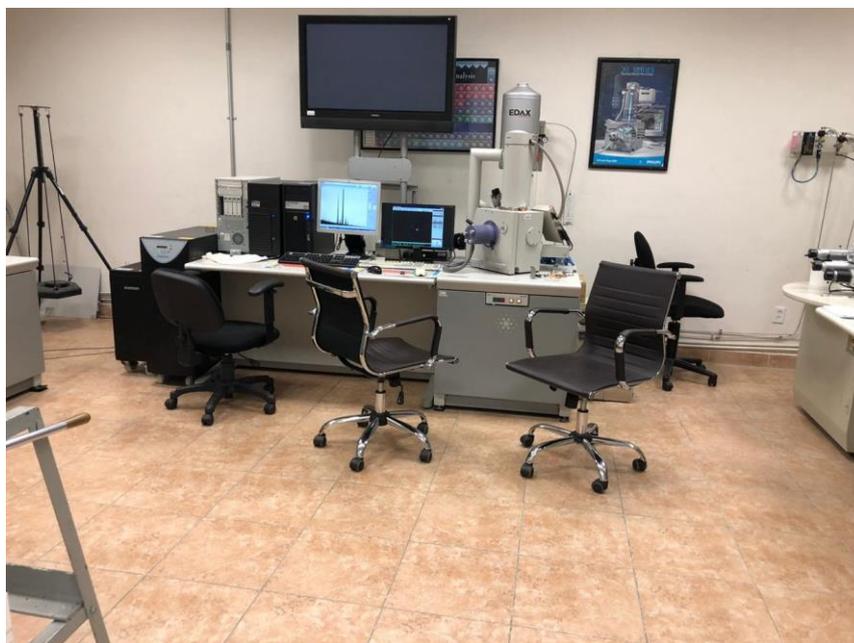


Figura 36. Microscopio electrónico de barrido PHILIPS XL30

Capítulo 6. Resultados y discusiones

En este capítulo, se presentan y discuten los resultados obtenidos del proyecto de investigación, realizado sobre láminas de una aleación de Al-Mg utilizados en tiras largas para la fabricación de persianas. Este material lleva un proceso previo de laminado en frío y posteriormente se le aplicó un tratamiento térmico de recocido (que actualmente no se le aplica a la materia prima). El estudio se enfocó en estudiar el efecto de las variables que intervienen en el proceso de recocido y que pueden afectar a la calidad y propiedades mecánicas de las piezas de aluminio, tales como: temperatura del tratamiento térmico y tiempo de permanencia del material a esta temperatura. Se estudió a profundidad, la evolución del tamaño de grano y la modificación en las propiedades mecánicas del material, así como las fases y compuestos formados en la microestructura. Cabe mencionar que los resultados presentados, fueron obtenidos de un trabajo experimental realizado en planta y laboratorio con la finalidad de evaluar las variables más importantes que modifican el comportamiento del material y que inciden en la disminución de las propiedades mecánicas y que a su vez incrementa el porcentaje de rechazo por *scrap* de material en el proceso de producción en el área de SANI.

6.1.- Composición química

Como se menciona con anterioridad la empresa cuenta con tres proveedores de los cuales no se cuenta con las características de dicho material en la planta donde se realizó este proyecto, la única información con la que se cuenta es que del lugar de procedencia los cuales son; Reynosa, Malasia y Fuzhao. Así que se procedió a analizar el material para obtener la composición química del material. La composición química de las muestras obtenidas del proceso de SANI después del laminado en frío, se analizó químicamente para verificar que estuvieran dentro del rango de especificaciones nominales. La Tabla IV, presenta la composición química experimental obtenida de los diferentes proveedores de las aleaciones estudiadas, mientras que la Tabla V, representa la composición nominal (ver anexo 1 para observar composición completa). De manera general se puede observar que los valores en la concentración de los elementos presentes en las muestras estudiadas se encuentran cercanos a los valores establecidos por la composición nominal y corresponden a las aleaciones 5052 y 5182, de acuerdo a la norma [11]. En función de estos resultados, se determinó que la composición química para los proveedores de

Malasia y Fuzhao corresponde a la aleación 5052, mientras que el material para el proveedor de Reynosa es de una aleación de aluminio 5182.

De acuerdo a la composición nominal, el principal elemento de aleación es el Mg, y es evidente la diferencia de este elemento en la composición química de los proveedores, debido a que el Mg tiene un efecto directo en las propiedades mecánicas de la aleación. La materia prima del proveedor Reynosa, es el que presenta un mayor contenido de Mg. Esto se traduce en una primera instancia que las propiedades mecánicas de la materia prima no es la misma para los diferentes proveedores, sin embargo, los esfuerzos ejercidos sobre las tiras de aluminio es la misma. Estos primeros resultados, pueden indicar que el desperdicio generado en el proceso de conformado mecánico en el área de SANI puede estar influenciado por la relación composición química/esfuerzos presentes.

Tabla IV. Composición química de los proveedores

Proveedor	Mg	Fe	Si	Cr	Mn	Cu	Al
Reynosa	4,76	0,162	0,039	0,05	0,371	0,012	Bal
Malasia	2,62	0,205	0,164	0,198	0,035	0,017	Bal
Fuzaho	2,59	0,216	0,083	0,175	0,004	<0,0001	Bal

Tabla V. Composición nominal

	Mg	Fe	Si	Cr	Mn	Cu	Al
5182	4,0-5,0	0,35	0,2	***	0,20-0,50	0,15	Bal
5052	2,2-2,8	0,4	0,25	0,15-0,35	0,1	0,1	Bal

6.2.- Ataque químico

En la Figura 37, se presentan los resultados de los primeros intentos para revelar la microestructura y el tamaño de grano en las aleaciones de aluminio estudiadas. Los primeros reactivos empleados fueron: Keller (HF 1 ml, HCl 1.5 ml, HNO₃ 2.5 ml y H₂O 100ml), reactivo Weck (NaOH 1g, KMnO₄ 4g y H₂O 100 ml), reactivo Barker (1.8% de ácido Fluorobórico en agua con una carga de 20-45V DC por 2 minutos) entre otros, los cuales aunque eran sugeridos por la literatura no evidenciaron la microestructura obtenida.

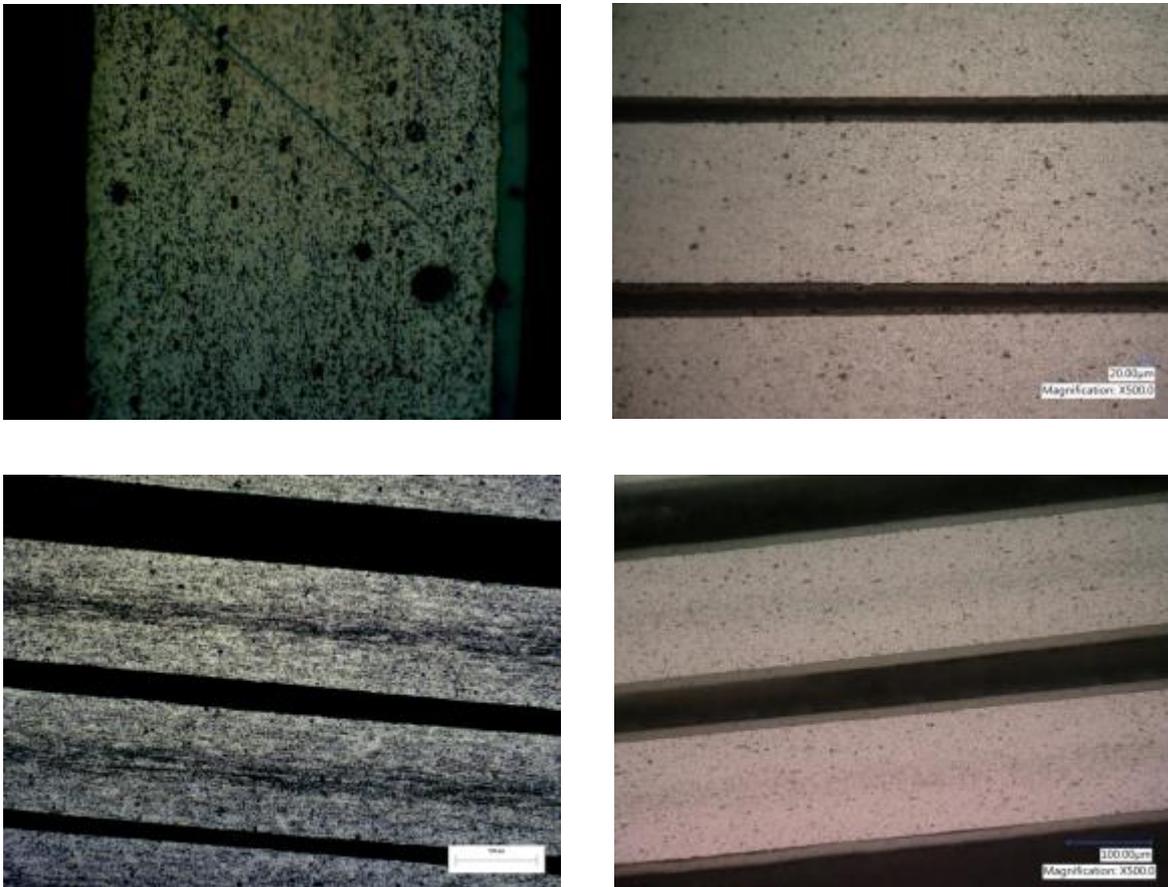


Figura 37. Microestructuras obtenidas con reactivos: Keller, Weck y Beacker

De las microestructuras mostradas en la Figura 37, se aprecia que bajo las condiciones de ataque químico con los reactivos utilizados no se alcanzaron a mostrar las fases de la microestructura o los granos formados. Se puede apreciar, que las muestras fueron sobre

atacadas con los reactivos y en algunos casos quemadas “puntos negros”, y en otras no fue suficiente la concentración de los reactivos empleados.

Posteriormente, se utilizó una solución de NaOH al 1% y se puede apreciar de acuerdo a la Figura 38, una mejoría en la microestructura presente de los *slats* de aluminio. Sin embargo, aún no se podían medir ni establecer las características morfológicas de las fases presentes, esto debido a que el material se encontraba con altas deformaciones productos del proceso de laminado en frío que se aplica para formar las láminas de aluminio, esto se observa en la Figura 38b, además de falta de una recuperación adecuada del material como se muestra en las Figura 38 a y c.

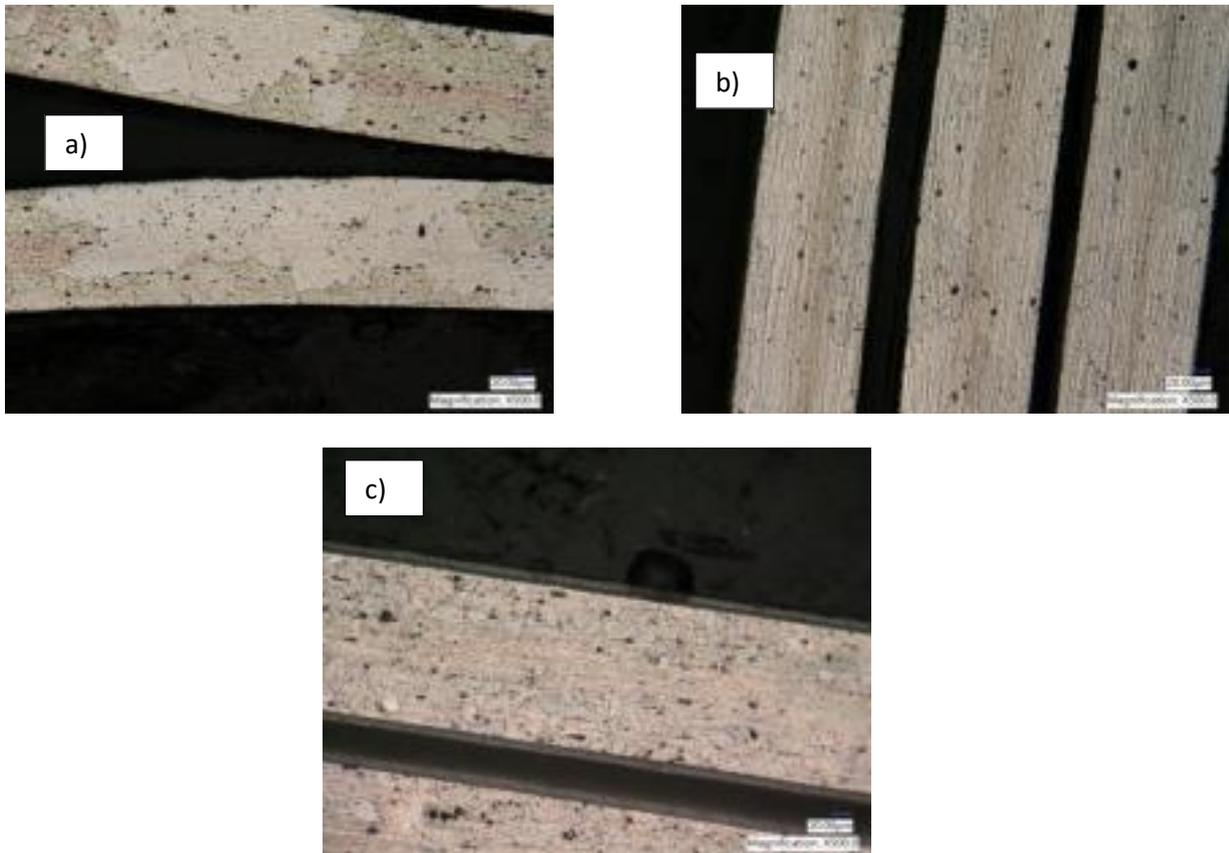


Figura 38. Resultado del ataque químico con NaOH al 1%

6.3.- Evolución del tamaño de grano

La Figura 38, muestra la microestructura a un aumento de 500X obtenida después del ataque químico con el reactivo de hidróxido de sodio al 1% y que corresponde al material de llegada por parte de los proveedores. Como se puede apreciar, la microestructura

presenta una morfología de granos no definidos y muy alargados a consecuencia del proceso de laminación en frío, además de presentar una cantidad considerable de impurezas (color oscuro) a consecuencia de los elementos de aleación. Definitivamente, este tipo de microestructura ofrecerá propiedades mecánicas reducidas en el material, donde la aplicación de esfuerzos inclusive no tan altos provocará una alta deformación plástica en el material en el momento del procesamiento. Una alternativa para revertir este problema y obtener mejores propiedades mecánicas en el material, es la aplicación de un tratamiento térmico de recocido el cual ayudará a aliviar esfuerzos residuales provocados durante la laminación.

En la Figura 39, se observa la microestructura obtenida de la evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a una temperatura de 450 °C y un tiempo de permanencia de 30 min para las tres muestras de los proveedores estudiados. Mediante el Software Image Pro-Plus versión 4.0 se calculó el tamaño de grano final después del recocido, para esto se midieron 10 campos y se obtuvo un promedio.

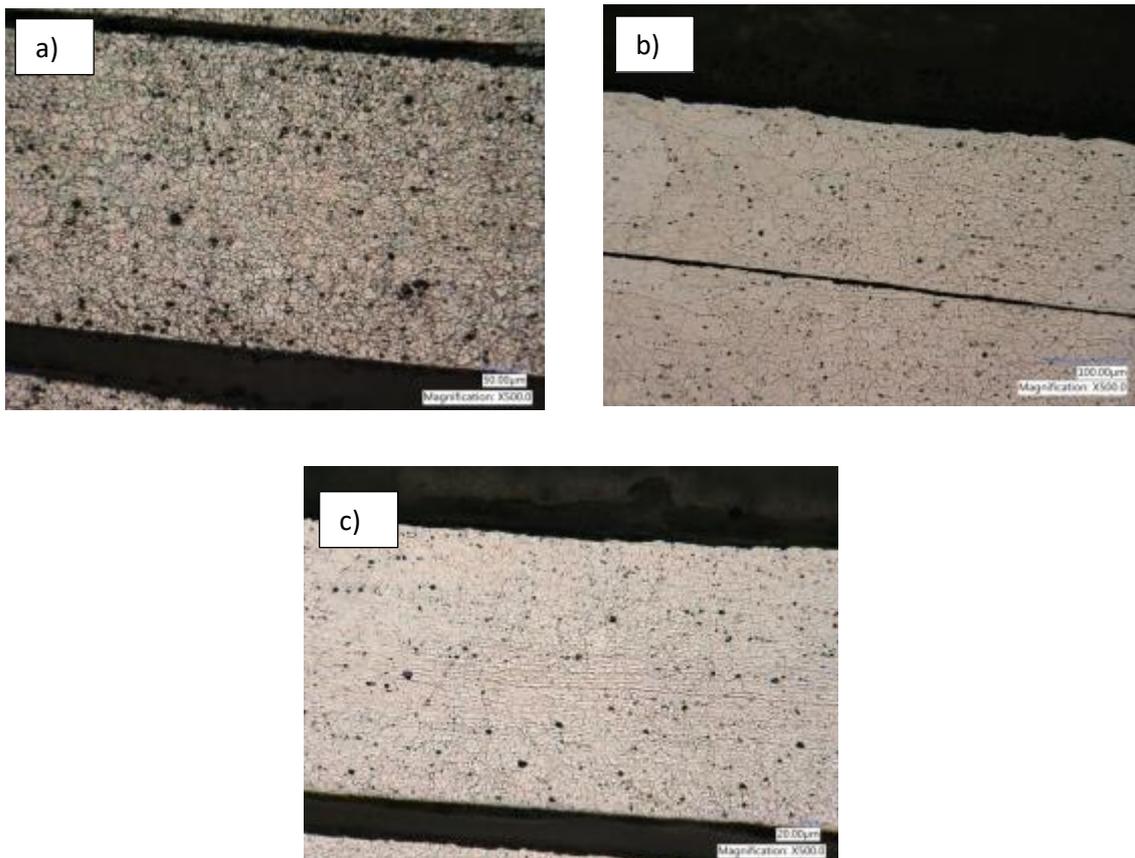


Figura 39. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 450 °C y 30 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.

Se puede observar que las tres muestras presentan diferencias notables en el tamaño de grano después del tratamiento térmico. La Figura 39a, que representa al proveedor “Reynosa”, presenta algunos granos recristalizados con un tamaño promedio de $12\ \mu\text{m}$, aunque la mayoría de los granos están totalmente formados, se pueden observar granos aún sin definir sus fronteras (si completar su recristalización). La Figura 39b, representa al proveedor “Fuzhao”, se puede observar una microestructura con granos completamente recristalizados y bien definidos el tamaño promedio de estos fue de $20\ \mu\text{m}$, se puede también apreciar un crecimiento anormal del grano en todo el material lo anterior se puede deber a múltiples factores tales como la anisotropía del material, el porcentaje del trabajo en frío (reducción), además, de la temperatura del tratamiento térmico en este caso el recocido. En la Figura 39c, se observa la microestructura de la evolución del tamaño de grano del proveedor “Malasia”, se puede observar que, para estas condiciones de tratamiento térmico de recocido, sólo un 10 % de todos los granos comenzaron el proceso de recristalización, el tamaño de grano alcanzado fue de $12\ \mu\text{m}$ aproximadamente, se pueden apreciar marcas del proceso de laminación en la parte central de la muestra.

En la Figura 40, se presentan las microestructuras del material tratado térmicamente con un tratamiento térmico de recocido a 500°C y un tiempo de permanencia de 30 minutos.

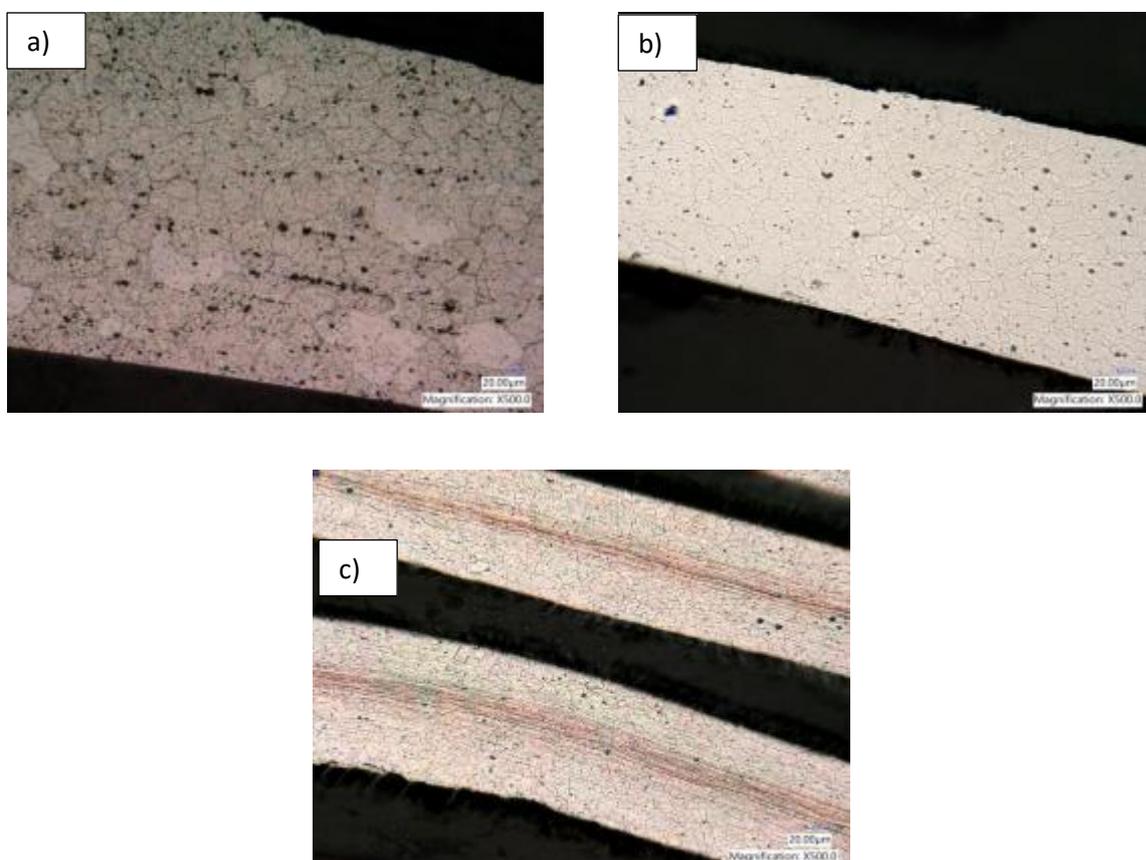


Figura 40. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 500°C y 30 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.

La Figura 40a, corresponde a la microestructura del proveedor de Reynosa, en la cual se observa una estructura recristalizada con un tamaño de grano de 16 μm , presenta un crecimiento de grano con respecto a la temperatura anterior de 450°C para el mismo tiempo de permanencia. La Figura 40b, corresponde a la microestructura obtenida del proveedor de “Fuzhao”, se puede apreciar una completa recristalización del material además de una mayor uniformidad en el tamaño de grano y aunque presenta algunos granos más grandes presentó un promedio en el tamaño de grano de 22 μm . En la Figura 40c, que representa al proveedor de Malasia, se puede apreciar que el material se aún no ha alcanzado el proceso de recristalización completo, presenta granos alargados y se obtuvo un promedio de tamaño de grano de 14 μm , además de presentar líneas de laminación visibles en la muestra, incluso son más notables que en el tratamiento anterior de 450°C.

La Figura 41, representa las microestructuras obtenidas de los materiales de los 3 proveedores con un tratamiento térmico de recocido de 550°C y un tiempo de permanencia de 30 minutos.

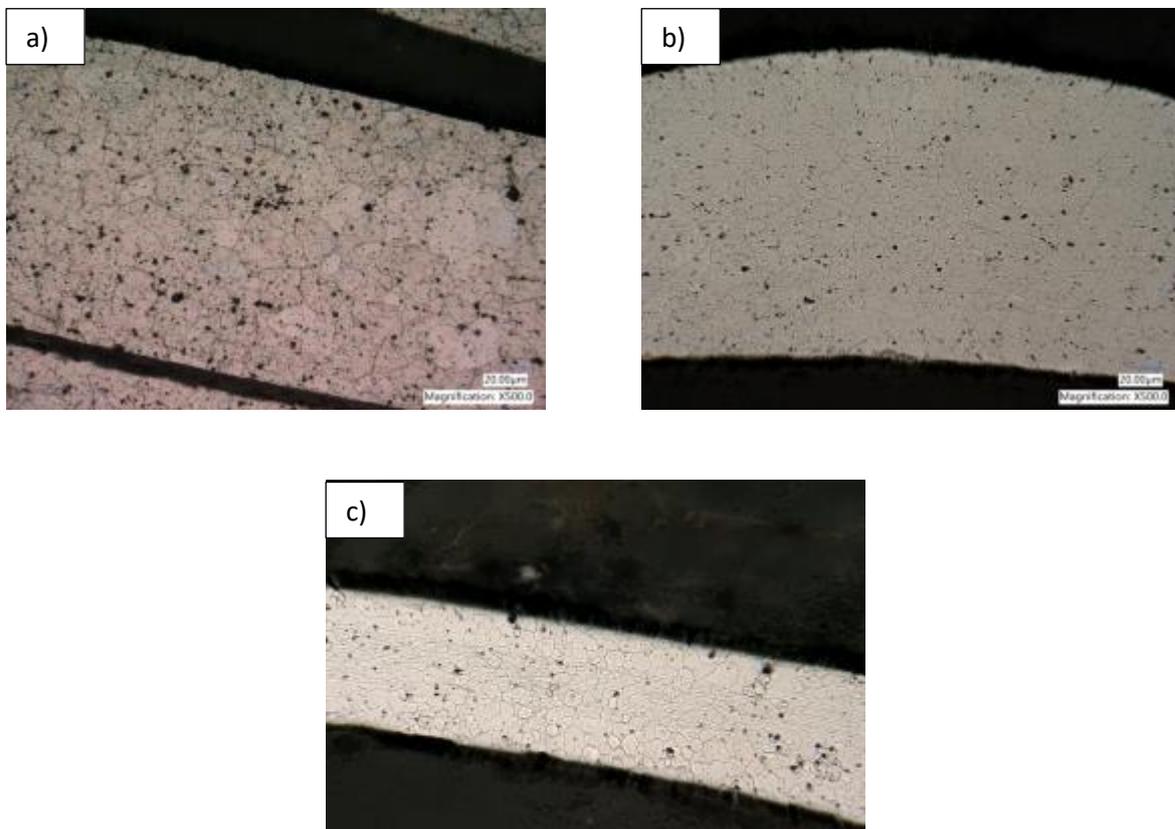


Figura 41. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 550 °C y 30 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.

La Figura 41a, representa al proveedor de “Reynosa”, se puede apreciar que el material bajo estas condiciones de procesamiento, los granos empezaron a crecer de manera importante a comparación con las temperaturas anteriores, aun así, se observaron ciertas regiones sin estar definidas, el promedio en el tamaño de grano obtenido fue de 21 μm . En la Figura 41b, que representa al proveedor de “Fuzhao” se observa una microestructura totalmente recrystalizada, con granos homogéneos, y con un promedio de 24 μm un poco mayor que la temperatura anterior. La Figura 41c, representa al proveedor de “Malasia”, se puede observar que esta microestructura presenta una recrystalización completa, y un incremento en el tamaño de grano obteniendo un promedio de 14 μm similar a la temperatura anterior pero más definido, aunque las líneas de deformación causadas por la laminación en frío siguen presentándose en el material.

En la Figura 42, se muestran las microestructuras obtenidas mediante el tratamiento térmico de recocido a una temperatura de 450°C con un tiempo de permanencia 60 minutos, para las tres muestras de la materia prima de los proveedores estudiados.

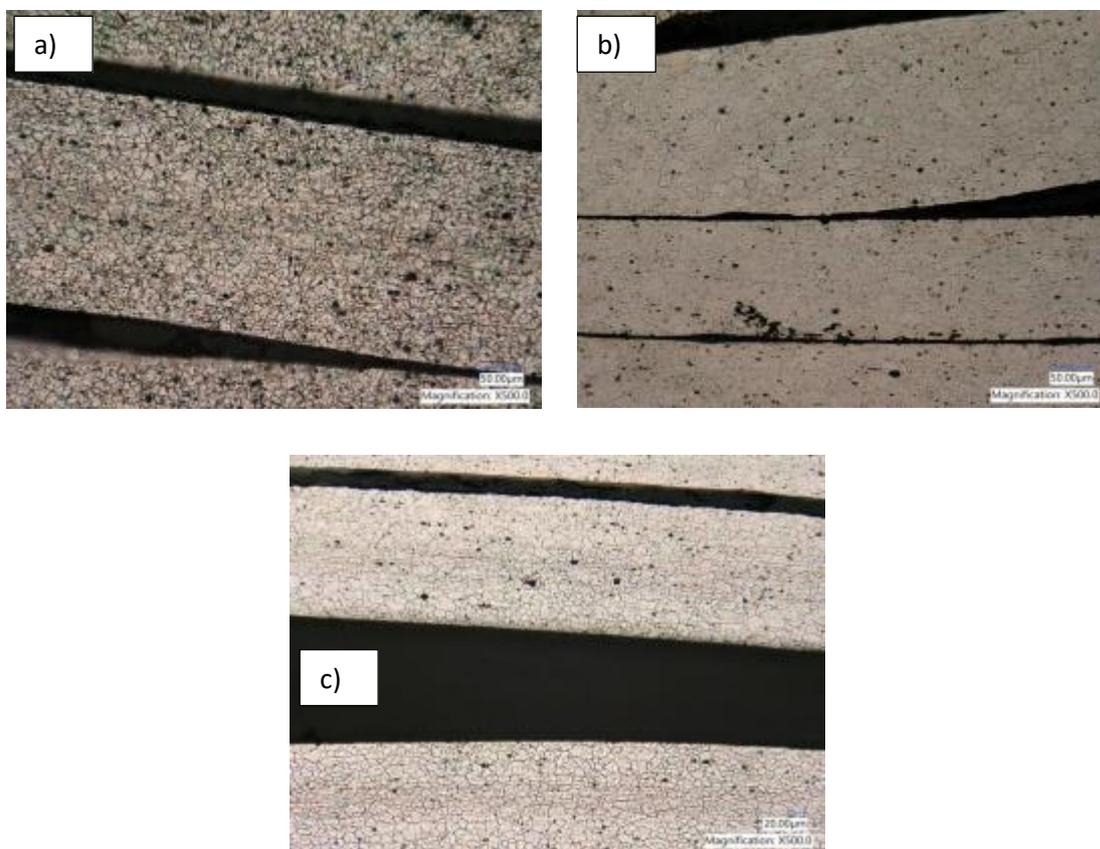


Figura 42. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 450 °C y 60 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.

La Figura 42a, representa al proveedor de “Reynosa”, y se observa en la microestructura una mejor distribución en el tamaño de grano recristalizado después del tratamiento de recocido, el tamaño de grano promedio obtenido fue de 11 μm , y aunque la cantidad de granos recristalizados fue mayor que el tratamiento a 450°C a 30 min de permanencia, aún se pudieron apreciar granos sin definir sus límites. La Figura 42b, del proveedor de “Fuzhao”, presenta una microestructura con granos definidos en la mayoría de la muestra, el promedio del tamaño de grano fue de 20 μm , se puede observar que el tamaño fue similar al tratamiento térmico a 450°C con 30 min, pero a esta temperatura no se observaron crecimientos anormales de granos. En la Figura 42c, que representa al proveedor de “Malasia”, se puede observar que las condiciones del material a la temperatura y tiempo estudiado han mejorado con respecto al tratamiento térmico de recocido a 450°C con un tiempo de permanencia de 30 minutos, el material muestra unos granos con sus fronteras definidas con un tamaño promedio de 12 μm , aunque aún se observan las líneas de laminación en el material.

En la Figura 43, se muestran las microestructuras obtenidas de las piezas tratadas mediante recocido a una temperatura de 500°C con un tiempo de permanencia de 60 min de los 3 proveedores estudiados.

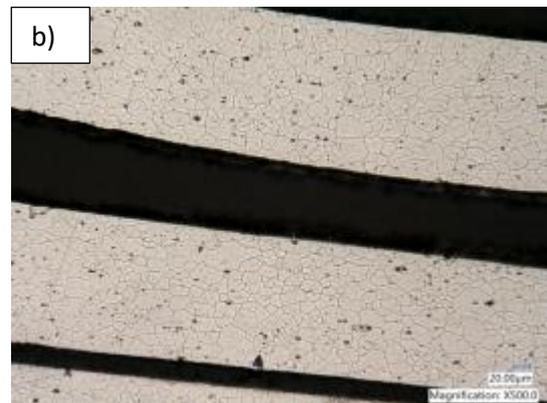


Figura 43. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 500 °C y 60 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.

En la Figura 43a, que corresponde al proveedor de “Reynosa”, se puede apreciar que bajo estas condiciones el crecimiento de grano es más evidente que las condiciones pasadas de temperatura y tiempo, y aunque existen granos mayormente alargados cercanos a 70 μm , el tamaño de grano promedio fue de 13 μm . En la Figura 43b, que corresponde al proveedor de “Fuzhao”, se puede apreciar que la microestructura del material presenta una recristalización completa de los granos, aunque se pudieron observar en diferentes zonas granos con diferentes dimensiones, el tamaño promedio de estos fue de 19 μm . La Figura 43c, que corresponde al proveedor de “Malasia” presenta una microestructura con granos alargados y bien definidos en sus fronteras de grano, sin embargo, aún se aprecian las líneas del proceso de laminación en frío, mayormente pronunciadas que en el tratamiento térmico de recocido a 450°C con un tiempo de permanencia de 60 min.

En la Figura 44, se muestran las microestructuras de la materia prima tratados térmicamente mediante recocido a una temperatura de 550°C y un tiempo de permanencia de 60 min para los 3 proveedores estudiados.

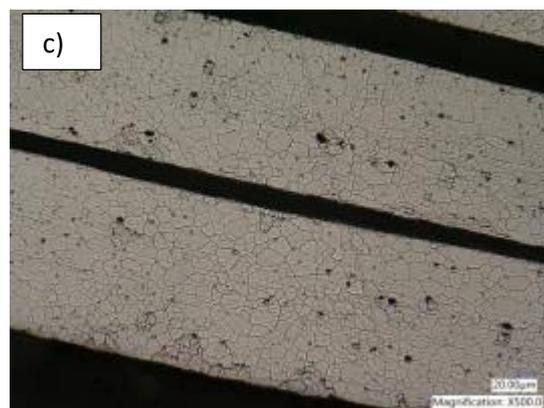


Figura 44. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 550 °C y 60 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.

En la figura 44a, que corresponde al proveedor de Reynosa, se puede observar una recristalización con un crecimiento anormal de los granos presentes, y un tamaño promedio de grano de 16 μm , mayor en 3 μm con respecto al tratamiento anterior, esto se puede deber a diversos factores tales como el grado de deformación del material, concentración de los elementos de la aleación, energía almacenada en el material, que el material sea anisotrópico, entre otras. En la Figura 44b, que corresponde al proveedor de “Fuzhao”, se presenta una microestructura completamente recristalizada y con granos mayormente homogéneos, presentó un tamaño de grano promedio de 18 μm . En la Figura 44c, que corresponde al proveedor de “Malasia”, se puede apreciar que la microestructura del material se encuentra completamente recristalizada, además de tener un crecimiento de grano homogéneo, el tamaño de grano promedio obtenido fue de 12 μm . Por otro lado, aun se logran observar las líneas de laminación en el material. Las bandas que se aprecian en el material son también conocidas como bandas de Lüder y se presentan como se mencionó anteriormente en aceros con bajo contenido en carbono y aleaciones de Al-Mg, según la literatura estas bandas ocasionan una irregularidad en la elongación del material, el cual es conocido como límite inferior de fluencia. Esto disminuye la calidad del material, debido a que el objetivo de los tratamientos de recocido es que el material sea más elástico y las bandas evitan ese propósito.

En la Figura 45, se muestran las microestructuras obtenidas después al tratamiento térmico de recocido a una temperatura de 450°C durante 120 min de permanencia. La Figura 45a, corresponde al proveedor de “Reynosa”, se puede observar que la microestructura presenta una recristalización completa de los granos, aunque es importante señalar que en diferentes secciones se presentó un crecimiento anormal en los granos, el promedio del tamaño de grano fue de 16 μm . La Figura 45b, que representa al proveedor de “Fuzhao”, presentó una microestructura con granos completamente recristalizada y en su mayoría homogénea, el tamaño de grano promedio fue de 16. La Figura 45c, que representa al proveedor de “Malasia”, presenta una recristalización completa y en su mayoría homogénea, presentó un tamaño de grano promedio de grano de 12 μm . Cabe señalar que aún bajo estas condiciones de tratamiento térmico se siguieron presentando las líneas de laminación en su mayoría en la parte central de las muestras estudiadas.

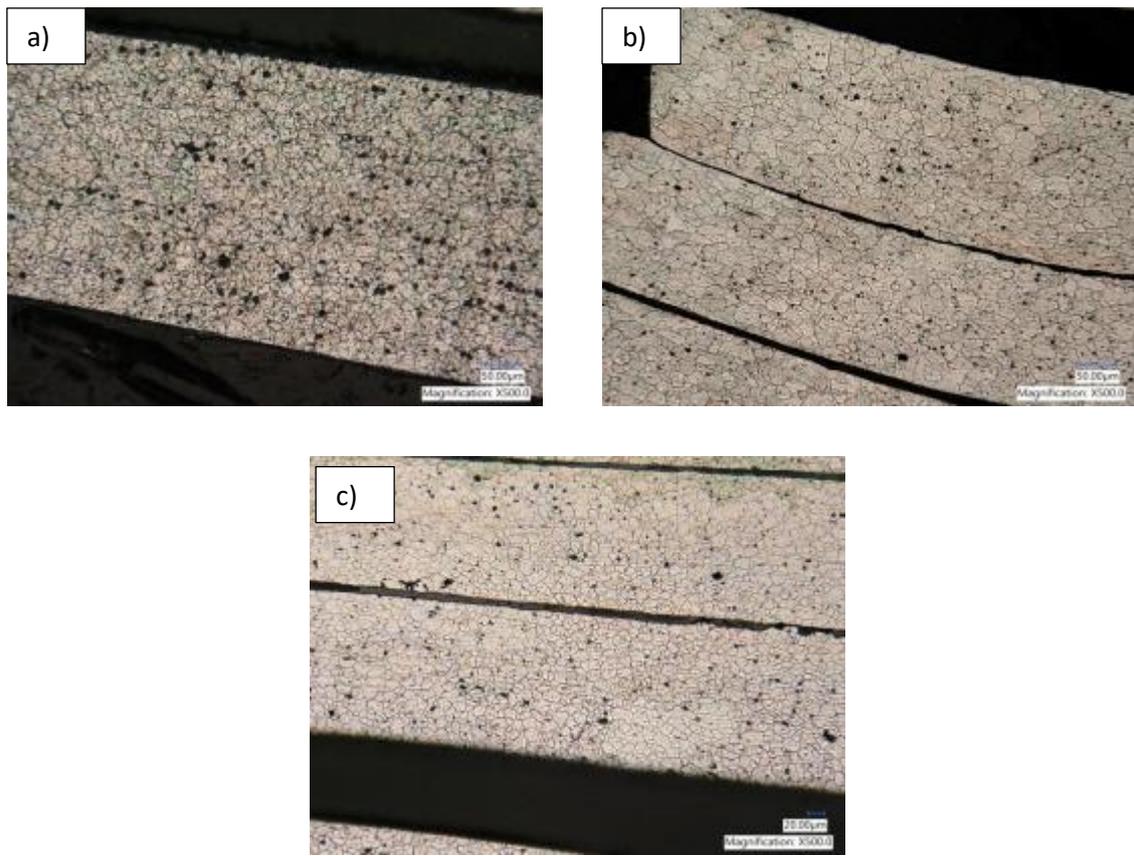


Figura 45. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 450 °C y 120 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.

En la Figura 46, se muestran las microestructuras obtenidas del tratamiento térmico de recocido a una temperatura de 500°C con un tiempo de permanencia de 120 minutos. En la Figura 46a, que corresponde al proveedor de “Reynosa”, se pueden apreciar la mayoría de los graos recristalizados, aunque en las diferentes secciones de la muestra estudiadas se observó granos sin definir sus fronteras y de mayor magnitud, el tamaño de grano promedio fue de 14 μm . En la Figura 46b, que corresponde al proveedor de “Fuzhao”, se puede apreciar una microestructura de granos completamente recristalizados, se observó que todas las áreas de la muestra presentaban homogeneidad de los granos después del recocido, presentó un tamaño de grano promedio de 18 μm . En la Figura 46c, que corresponde al proveedor de “Malasia”, se puede observar una microestructura con una recristalización completamente homogénea, y presentó un tamaño de grano promedio de 16 μm , en muy pocas áreas se logró observar aun líneas del proceso de laminación.

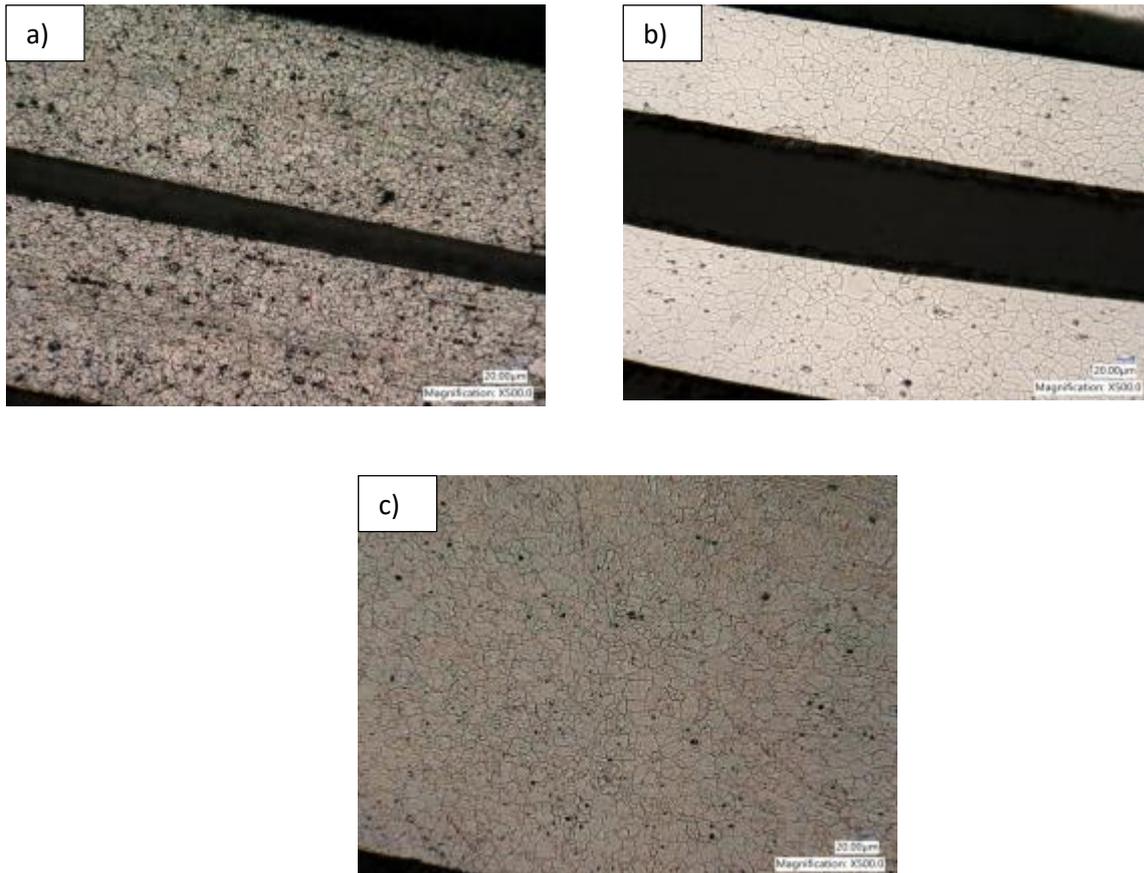


Figura 46. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 500 °C y 120 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.

En la Figura 47, se muestran las microestructuras en los materiales tras el tratamiento térmico de recocido a una temperatura de 550°C y con un tiempo de permanencia de 120 min, de los tres proveedores. En la Figura 47a, que corresponde al proveedor de “Reynosa”, se puede apreciar una microestructura recristalizada, sin embargo, se observaron una distribución heterogénea de los granos, el tamaño de grano promedio fue de 15 µm. En la Figura 47b, que corresponde al proveedor de “Fuzhao”, se muestra una microestructura de granos totalmente recristalizados y uniforme, el tamaño de grano promedio fue de 19 µm. En la Figura 47c, que corresponde al proveedor de “Malasia”, se puede observar una microestructura con una recristalización completa, además de observarse una uniformidad en toda la muestra, el tamaño de grano promedio fue de 15 µm, en algunas zonas de las muestras se observaron las líneas del proceso de laminación y aún con las condiciones de tratamiento térmico aplicado no fueron eliminadas totalmente.

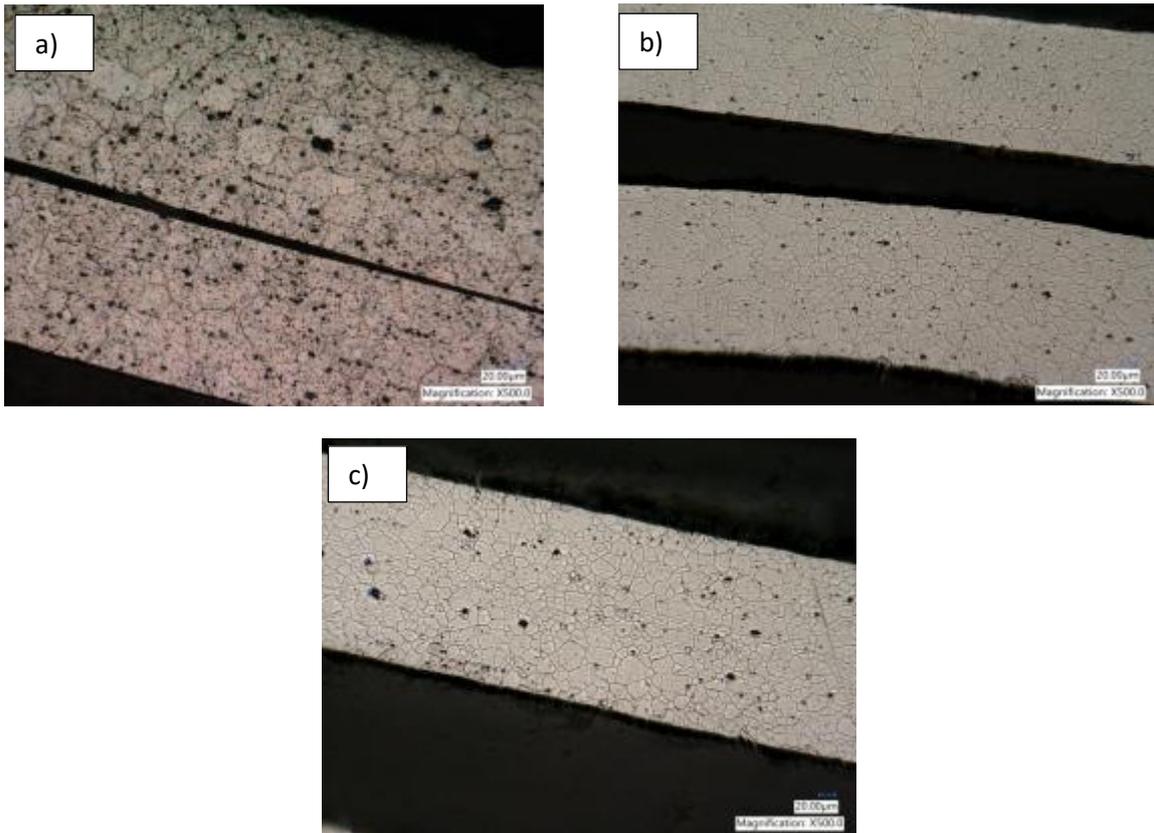


Figura 47. Evolución del tamaño de grano después de un tratamiento térmico de recocido a 550 °C y 120 minutos de permanencia; a) Reynosa, b) Fuzhao y c) Malasia.

Adicionalmente a los estudios experimentales llevados a cabo y mostrados en las Figuras 39–47, se evaluó el comportamiento del material de los 3 proveedores durante el tratamiento térmico de recocido a una alta temperatura determinándose en 600 °C, con la finalidad de estudiar el efecto de la temperatura en el crecimiento de grano. Debido a que la temperatura estudiada estaba cercana a la temperatura de fusión de la aleación, el crecimiento de grano fue muy acelerado. Inclusive se observó el material al retirarlo del horno con poca resistencia. En la Figura 48, se puede observar las características microestructurales del tamaño de grano obtenido. Es importante señalar, que la temperatura juega un papel importante en la velocidad de crecimiento de grano, sin embargo, debe evaluarse a temperaturas menores de 600 °C.

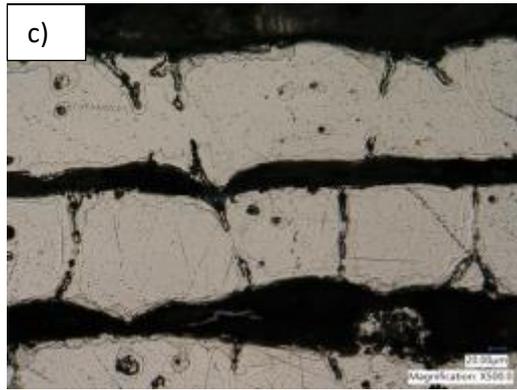
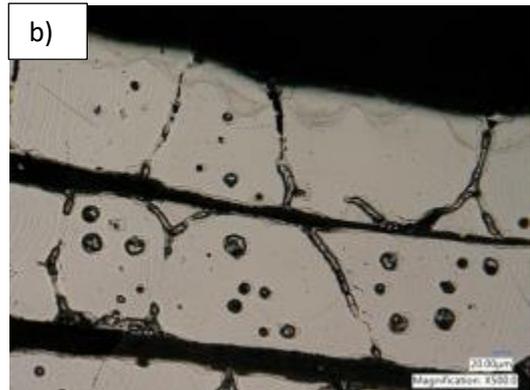
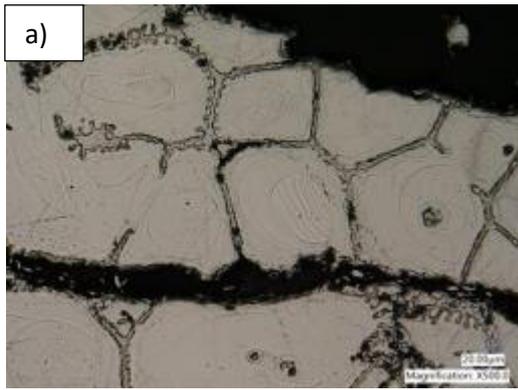


Figura 48. Tratamiento térmico a 600°C a) Reynosa b) Fuzhao c) Malasia

6.4.- Caracterización microestructural y medición del tamaño de grano

La Figura 49, representa el efecto de la temperatura del tratamiento térmico de recocido a un tiempo de permanencia de 30 minutos sobre la evolución del crecimiento de grano, de la materia prima de los proveedores estudiados. De manera general, se puede observar un comportamiento similar para las muestras estudiadas, y esto quiere decir que el incremento de la temperatura tiene un efecto directo en el crecimiento del grano para todas las muestras. El promedio del tamaño de grano del material de llegada sin tratamiento térmico fue de 11 μm . Sin embargo, a medida que la temperatura de tratamiento térmico incremento, el crecimiento del grano en las muestras analizadas fue evidente. Se puede apreciar, que el proveedor “Fuzhao” fue el que presentó desde la temperatura más baja estudiada (450°C) un mayor crecimiento, y conforme la temperatura del recocido fue mayor creció, pero en menor porcentaje. El comportamiento en el crecimiento del tamaño de grano para los proveedores de “Reynosa” y “Malasia” fue muy similar. Ahora bien, el tamaño obtenido a la más alta temperatura estudiada (550°C) para un tiempo de 30 min, presentó diferencias en las muestras estudiadas, y estas fueron de 16, 21 y 25 μm , para los proveedores de “Malasia”, “Reynosa” y “Fuzhao” respectivamente.

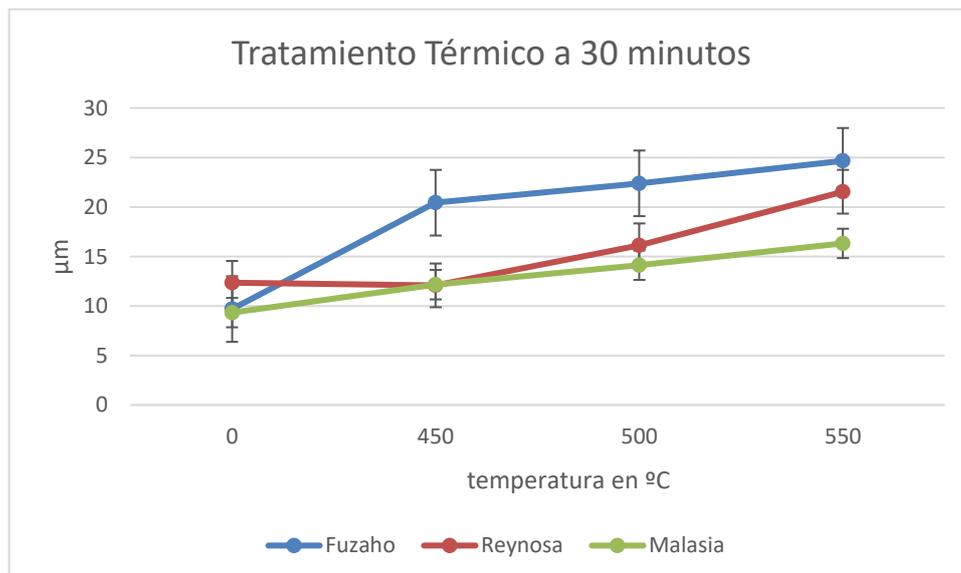


Figura 49. Resultado de tamaño de grano 30 minutos.

En la Figura 50, se muestra el efecto de la temperatura del tratamiento térmico de recocido a un tiempo de permanencia de 60 minutos sobre la evolución del crecimiento de grano, de la materia prima de los proveedores estudiados. De los resultados obtenidos, se puede observar que presentan un comportamiento similar a la Figura 49, teniendo una fuerte influencia la temperatura de recocido sobre la evolución en el crecimiento del grano en la aleación. Mientras que el proveedor de “Fuzhao” presenta un rápido crecimiento en el tamaño de grano para la temperatura más baja estudiada, las muestras de los proveedores de “Reynosa” y “Malasia” tienden a presentar muy poco crecimiento de grano para esta temperatura. Para la temperatura más alta de tratamiento de recocido el tamaño de grano fue de 19, 17 y 14 μm para los proveedores de “Fuzhao”, “Reynosa” y “Malasia”, respectivamente. Cabe mencionar que para las muestras de “Fuzhao” después de la temperatura de 450 °C hubo un pequeño descenso en el crecimiento de grano, lo anterior debido probablemente al crecimiento no homogéneo de la muestra para estas condiciones. También se puede comentar, que a comparación con la Figura 49, la temperatura tiene un efecto mayormente marcado que el tiempo de permanencia.

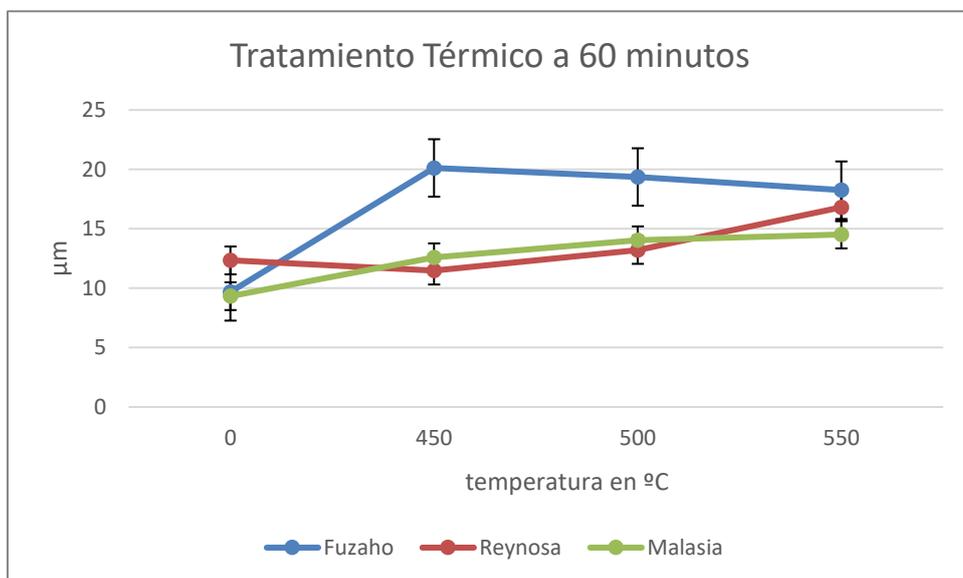


Figura 50. Resultado de tamaño de grano 60 minutos.

En la Figura 51, se muestra el efecto de la temperatura del tratamiento térmico de recocido a un tiempo de permanencia de 120 minutos sobre la evolución del crecimiento de grano,

de la materia prima de los proveedores estudiados. De los resultados obtenidos, se puede observar que existe una fuerte dependencia de la temperatura con la evolución del tamaño de grano. Para estas condiciones, los tres proveedores presentar un incremento similar durante el aumento de la temperatura de recocido y se observa más pronunciada a la temperatura de 450°C. Con la temperatura de tratamiento más alta estudiada (550°C) el tamaño de grano fue de 20, 16 y 15 μm para los proveedores de “Fushao”, “Malasia” y “Reynosa”, respectivamente.

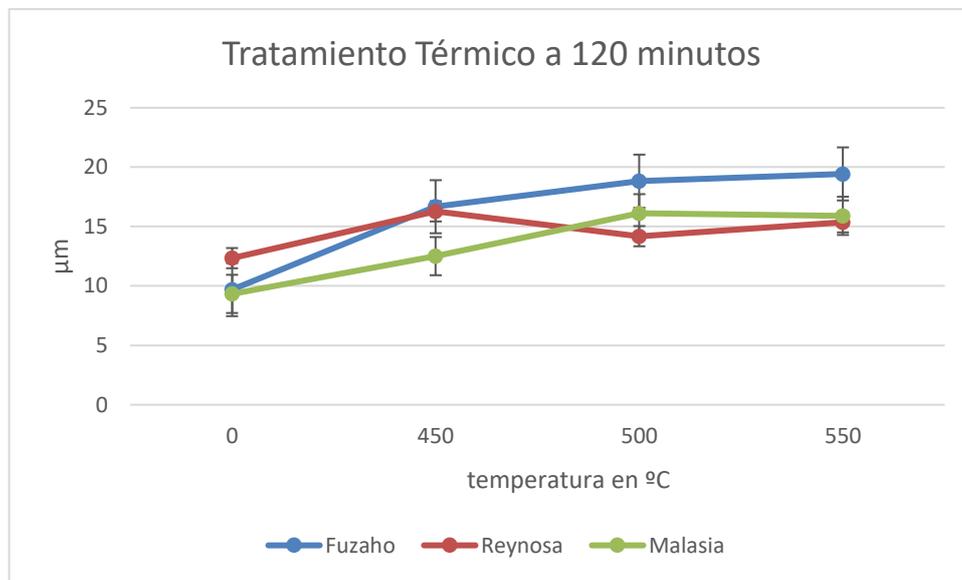


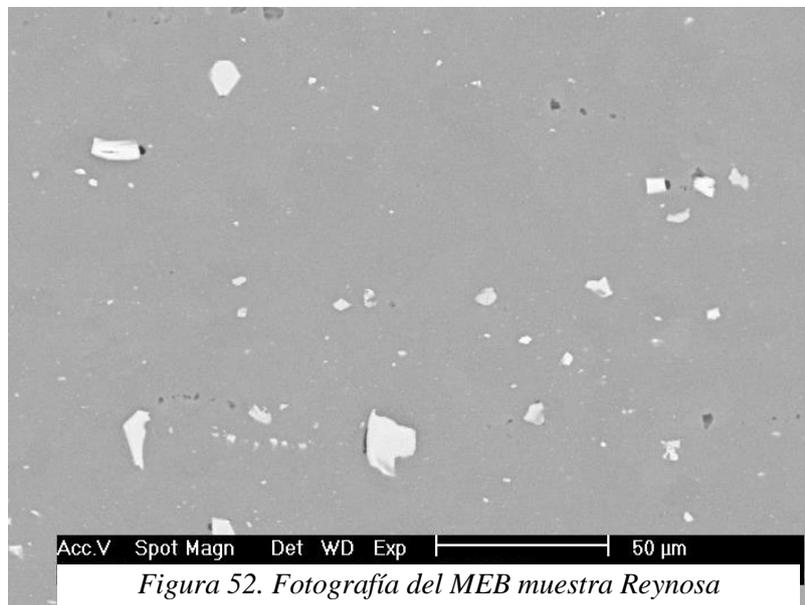
Figura 51. Resultado de tamaño de grano 120 minutos.

6.5.- Análisis de fases e intermetálicos mediante MEB

Después de los tratamientos térmicos de recocido realizados a las muestras de las aleaciones de Al-Mg para los tres proveedores estudiados, se seleccionaron las muestras

más representativas de cada proveedor para caracterizar la morfología de las fases presentes en la microestructura. La determinación de la composición química de las fases y/o compuestos intermetálicos presentes fueron determinados mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) con la ayuda del detector de energía dispersiva EDX que permitió realizar microanálisis puntuales en las zonas y fases de interés. Las Figuras 52, 53 y 54, corresponden a muestras representativas de los proveedores de “Reynosa”, “Fuzhao” y “Malasia”, donde se presentan fotomicrografías obtenidas mediante MEB de la sección transversal de las láminas de las aleaciones de Al estudiadas en el tratamiento térmico de recocido a diferentes temperaturas y tiempos de permanencia.

La Figura 52, presenta una microestructura que consiste principalmente de fases con morfología irregular (color blanco) con tamaño promedio de 20 μm distribuidas por toda la muestra, estas fases son características de los compuestos de Al con Si, Mn y Fe. Lo anterior, de acuerdo al análisis químico obtenido mediante EDX. Las fases del tipo Al-Si-Fe son consideradas partículas o compuestos intermetálicos indeseados en este tipo de aleaciones debido a que por su alta dureza son sitios de concentración de esfuerzos, que pueden generar grietas o fracturas en el material cuando se aplican un esfuerzo.



La Figura 53, presenta una microestructura consiste principalmente de fases con morfología irregular (color blanco) con tamaño promedio menores a 10 μm distribuidas por toda la muestra. Este tipo de fases se observó en mayor cantidad, pero de menor tamaño que las mostradas en la Figura 52, y son características de los compuestos de Al con Si, Fe y Mn. Estas fases y su característica química fueron determinadas mediante

EDX. El tipo de fases “Al-Si-Fe”, como se ha mencionado anteriormente, son perjudiciales en las aleaciones de aluminio, debido a su alta dureza y a que concentran esfuerzos que pueden llegar a causar grietas o facturas en el material al aplicarse un esfuerzo.

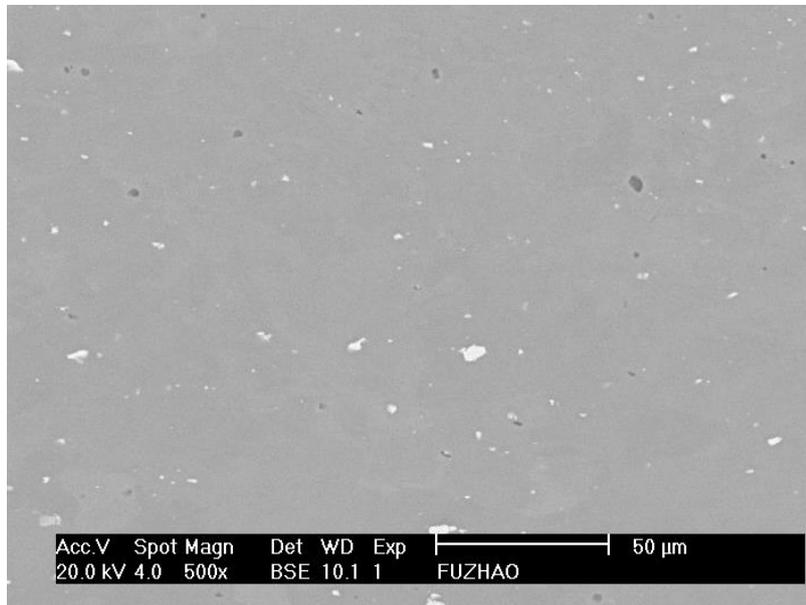


Figura 53. Fotografía del MEB muestra Fuzhao

La Figura 54, muestra una fotomicrografía obtenida mediante MEB, y al igual que en las Figuras 52 y 53, fueron observadas fases intermetálicas con morfología irregular (color blanco) con un tamaño promedio de 9 μm característicos de compuestos Al-Fe-Si fases indeseables en este tipo de aleaciones. Así mismo, se observaron fases intermetálicas en forma circular (color negro) con un tamaño promedio de 4 μm , los cuales corresponden a compuestos Al-Mg-Mn, este tipo de compuestos intermetálicos pueden llegar a favorecer las propiedades mecánicas debido a que no contienen elementos Fe-Si que junto al Al forman intermetálicos de alta dureza.

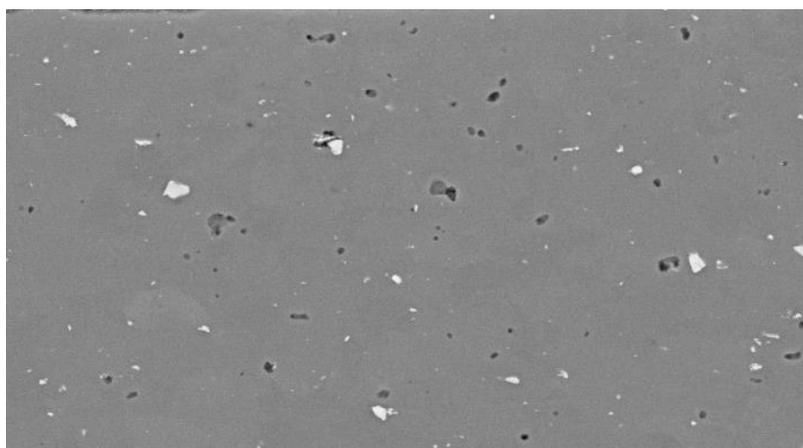
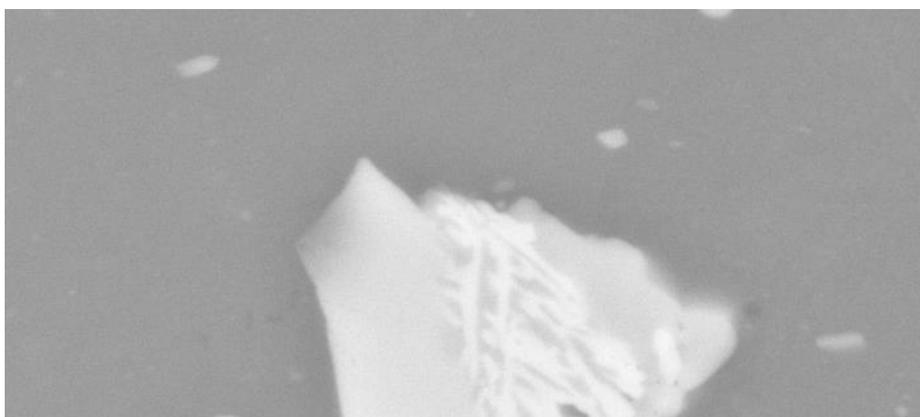


Figura 54. Fotografía del MEB muestra Malasia

Las Figuras 55 y 56, muestran una imagen mediante MEB donde se aprecian a mayor magnitud la morfología de los tipos de compuestos intermetálicos encontrados en las muestras analizadas. Así como, los microanálisis puntuales de estas fases donde se puede observar el tipo de elementos presentes obtenidos mediante EDX.

En la Figura 55, se muestra un compuesto intermetálico del tipo Al-Fe-Si-Mn observado en la mayoría de las zonas de las diferentes muestras analizadas. La composición química de los compuestos mencionados a continuación, fueron relacionados con artículos similares y de acuerdo al Handbook Alloy Phase Diagrams ASM [63]. Se puede observar que el elemento dominante es el Al, seguido del Fe, cabe recordar que este último elemento no es deseado en este tipo de aleaciones por la reducción en las propiedades mecánicas de la aleación. Por otro lado, en la Figura 56, se muestra una imagen obtenida mediante MEB donde se aprecia un compuesto de tipo intermetálico característicos del tipo Al-Mg-Si. De acuerdo a los diferentes análisis estudiados los principales intermetálicos encontrados fueron: Al_6Mn , Al_3Mg_2 , AlMg_4Si_3 , Al_5Fe y Al_3MgSi , estos para el proveedor de “Reynosa”. En las muestras de “Fuzhao”: Al_3Fe , Al_6MgSi . Mientras para las muestras de “Malasia”: se encontraron AlMg_2Si , Al_4Fe , Al_2MgSi , $\text{Al}_{15}\text{Fe}_3\text{Si}$, Al_5Fe y AlMgSi .



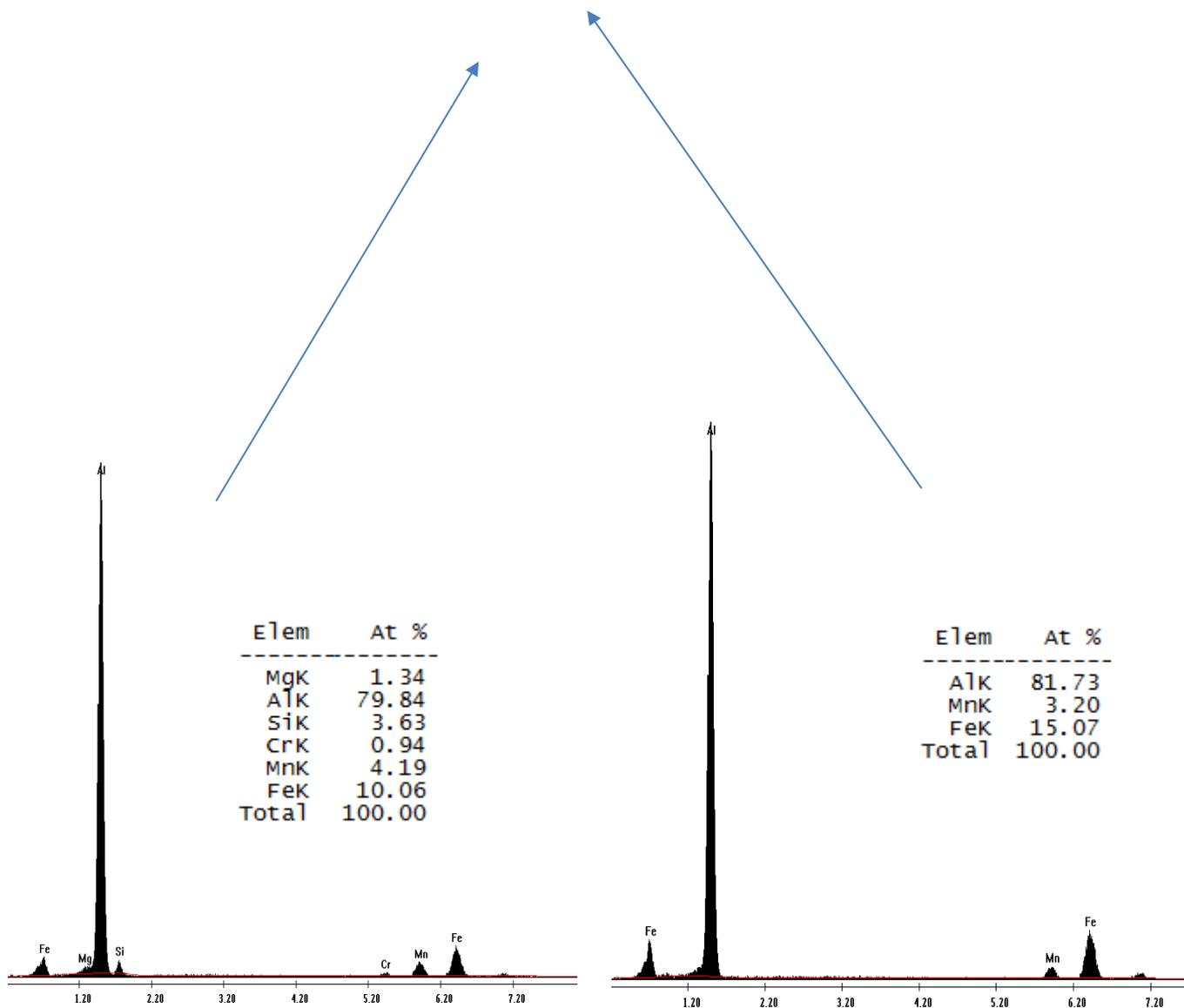
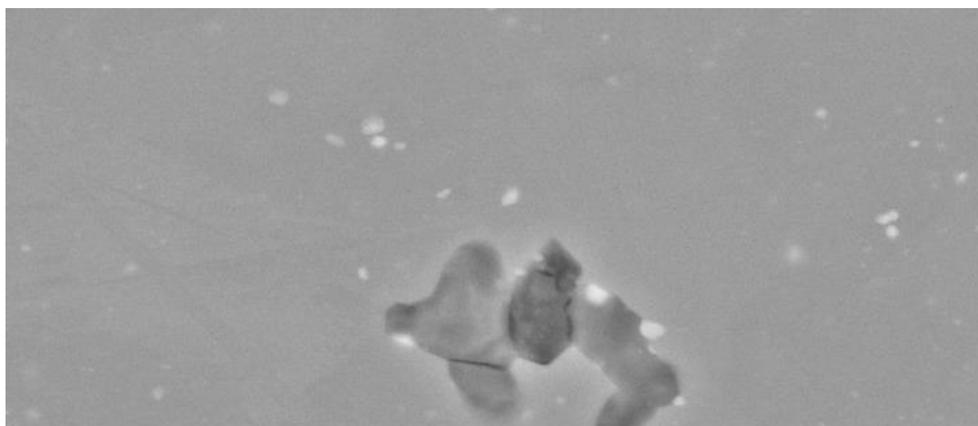


Figura 55. Análisis EDX de intermetálico color blanco



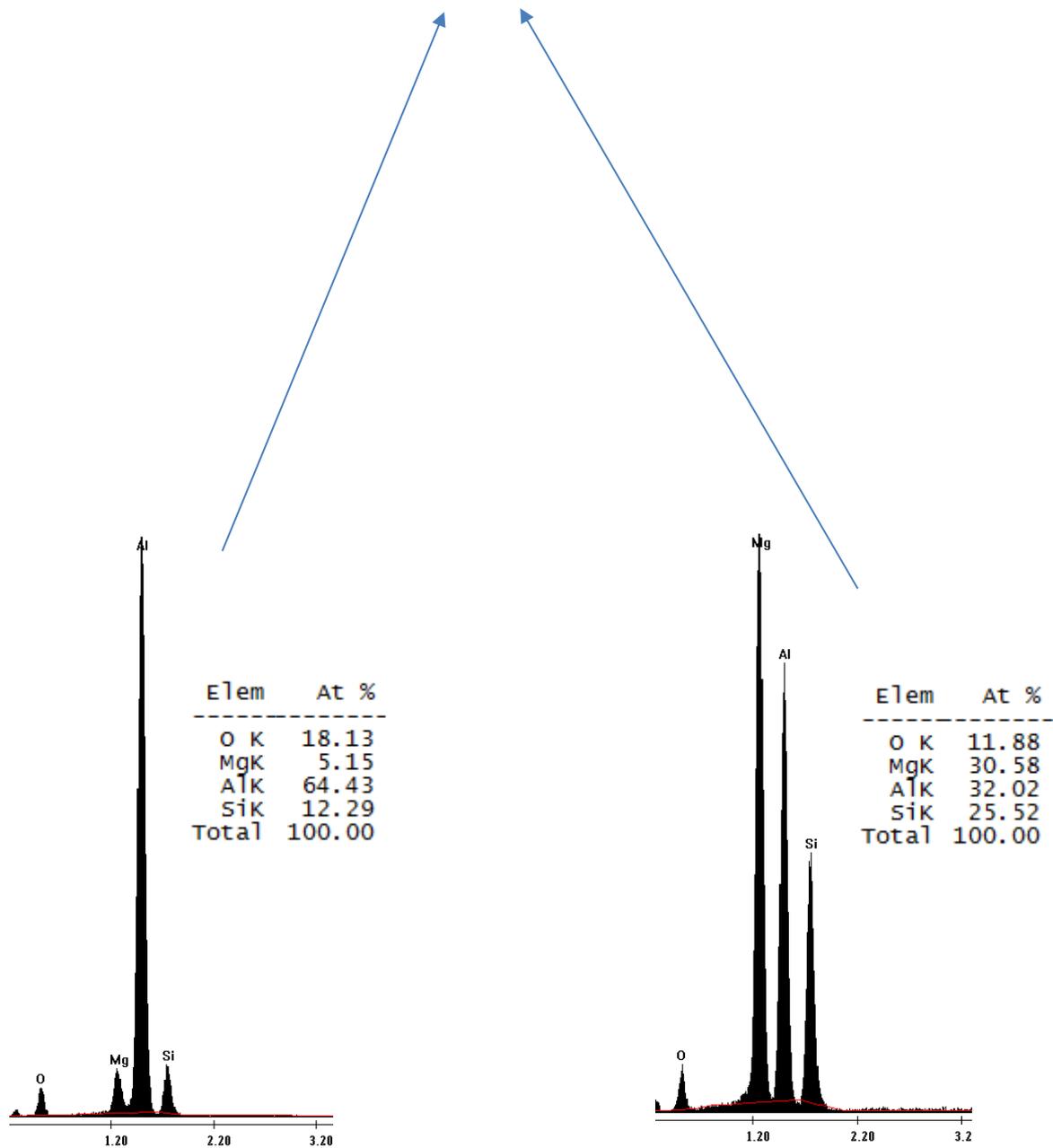


Figura 56. Análisis EDX de intermetálico color oscuro

6.6.- Microdureza Vickers

Para determinar la dureza de las muestras estudiadas de los diferentes proveedores, se llevaron a cabo análisis de microdureza en escala Vickers el cual en el Anexo 2 se aprecia

la tabla de equivalencia de Vickers a kgf. Las Figuras 57, 58 y 59, representan el comportamiento de esta propiedad después del tratamiento térmico de recocido, los resultados son un promedio de 10 mediciones por muestra analizada, en función de la temperatura para los diferentes tiempos estudiados. Cabe señalar que previo al tratamiento térmico, se realizaron medidas de dureza del material en su condición de llegada y el promedio de dureza resultó en: 122, 81 y 73 HV, para las muestras de los proveedores de “Reynosa”, “Malasia” y “Fuzhao” respectivamente. Los resultados iniciales de dureza, están acordes a la dureza esperada, siendo las muestras de “Reynosa” las de mayor dureza debido a la mayor concentración de Mg en la aleación.

En la Figura 57, se presenta los resultados obtenidos de las muestras estudiadas para un tiempo de 30 min. Se puede observar, que las tres muestras estudiadas presentan el mismo comportamiento, al comenzar el tratamiento de recocido con la primera temperatura 450 °C, la dureza disminuye de manera significativa en los tres casos. Lo anterior se puede relacionar con el incremento en el tamaño de grano para esta misma temperatura, y mostradas en las Figuras de la 49 a la 51. La mayor caída de dureza se presentó en la muestra de “Reynosa” disminuyendo de 122 a 87 HV representando casi un 30%, mientras que las muestras de “Fuzhao” fueron las que menor cambio en la dureza presentaron de 73 a 61 HV lo que se traduce en un 17%. Con el incremento de la temperatura (500 °C) la dureza en el material disminuye, pero en pocas unidades de dureza. Posterior a los 500 °C de tratamiento térmico de recocido se observó un incremento en la dureza de las muestras, este aumento se puede deber a la mayor precipitación de fases que se observaron en las muestras bajo estas condiciones en especial los del tipo Al(Mn-Fe) y Al(Mn-Fe-Si). También se debe considerar la forma y las condiciones de enfriamiento del material, a mayor velocidad de enfriamiento la dureza en los materiales es mayor.

En la Figura 58, se observan los resultados de la microdureza obtenida después de los tratamientos de recocido para un tiempo de permanencia de 60 min. El comportamiento en los resultados de dureza fue similar a la mostrada en la Figura 57, presentándose una disminución marcada en las primeras dos temperaturas ensayadas, mientras que a la temperatura más alta (550 °C) la dureza vuelve a incrementar para todas las muestras ensayadas. La dureza a esta temperatura fue de 96, 66 y 65 HV para las muestras de “Reynosa”, “Fuzhao” y “Malasia”, respectivamente.

En la Figura 59, se presentan los resultados obtenidos de la microdureza después del tratamiento térmico de recocido para un tiempo de permanencia de 120 min. Se puede observar que el comportamiento en la dureza es similar a las Figuras 57 y 58, sin embargo, la disminución de microdureza para las tres muestras es mayor y se presenta más evidente en las primeras dos temperaturas estudiadas (450 y 500 °C). A la temperatura de 550 °C, la dureza vuelve a incrementar para quedar en niveles de 100, 61 y 60 HV para las muestras de “Reynosa”, “Fuzhao” y “Malasia”, respectivamente.

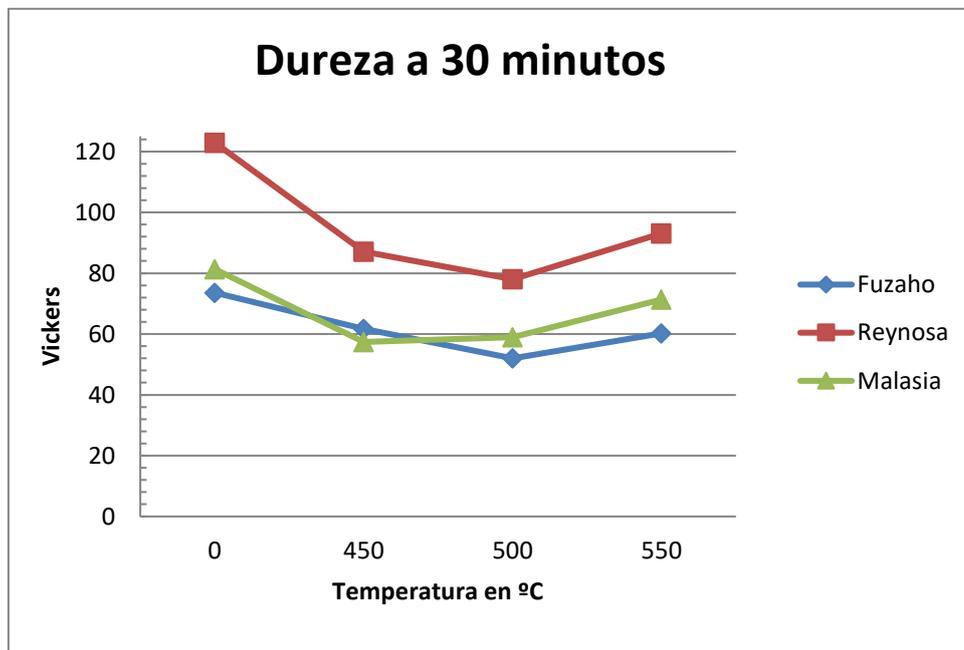


Figura 57. Resultados de Microdureza 30 minutos



Figura 58. Resultados de Microdureza 60 minutos

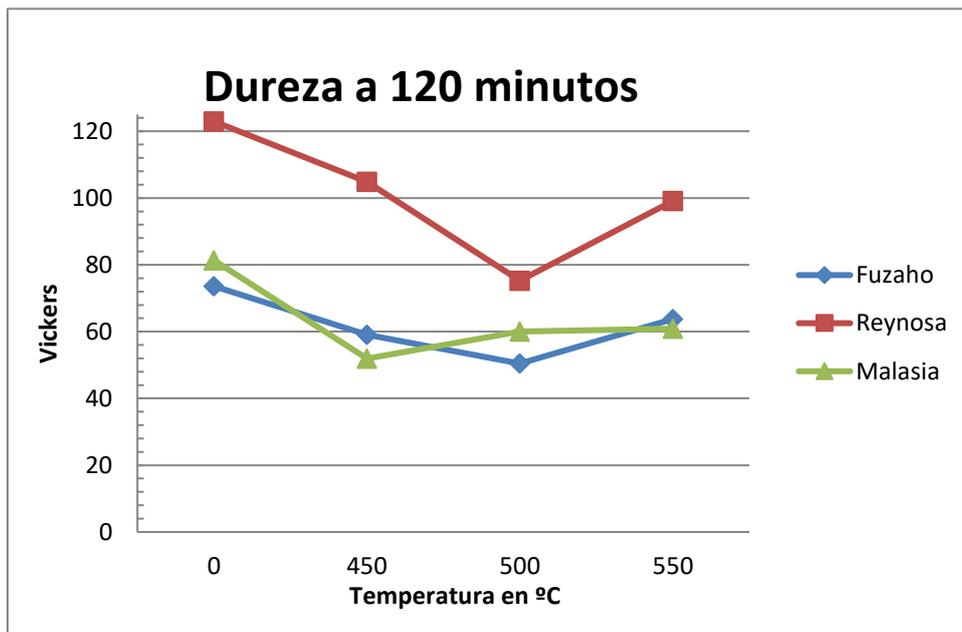


Figura 59. Resultados de Microdureza 120 minutos

6.7. Resistencia mecánica

En la Tabla VI, se presentan las propiedades mecánicas obtenidas mediante ensayos de tensión a las muestras de los proveedores de “Reynosa” y “Malasia”, cabe mencionar que se eligieron estas muestras debido a que fueron las más representativas y además de presentar condiciones y propiedades diferentes, y las temperaturas elegidas fueron las que presentaban de igual forma mayor diferencia con respecto al crecimiento de grano y dureza. Las muestras de 2.54 x 16 cm de ancho y largo respectivamente, se prepararon de acuerdo a la norma ASTM E8 para muestras planas.

De la Tabla VI, se puede observar que para las muestras de “Reynosa” el esfuerzo de cedencia presenta un cambio en pérdida de dureza de 100 MPa en función de la temperatura. La pérdida de dureza está relacionada con el crecimiento de grano en la aleación. Con respecto a la elongación del material para el mismo proveedor, como era de esperarse se presenta un incremento en 2.2%, debido al incremento de la temperatura. Para las muestras de “Malasia” se puede observar que el esfuerzo de cedencia no presentó cambio significativo con el incremento de la temperatura, así como también el % de elongación del material no tuvo cambio significativo por efecto de la temperatura. Esto se puede atribuir a la poca diferencia en el crecimiento de grano en las diferentes temperaturas y tiempos estudiados, así como también la presencia de compuestos intermetálicos contribuyó a incrementar la resistencia del material.

Tabla VI. Propiedades mecánicas obtenidas de ensayos mecánicos a tensión de las muestras estudiadas.

Proveedor	Temperatura de recocido (°C)	Esfuerzo de cedencia		Resistencia a la tensión		% elongación
		MPa	Psi	MPa	Psi	
Reynosa	450	260.49	37780	317.95	46114	6.91
Reynosa	550	168.10	24381	279.85	40588	9.21
Malasia	450	174.13	25296	303.55	44026	6.95
Malasia	550	173.41	25110	280.40	40669	7.10

6.8.- Conclusiones

1. El material de llegada de los tres proveedores presentaba una microestructura con notables deformaciones, las muestras de “Malasia” fueron las que mayor deformación a

consecuencia de la laminación en frío tuvieron aún después del tratamiento de recocido. Se debe analizar cuidadosamente la materia prima de los diferentes proveedores, para determinar el grado de deformación que tienen y valorar el uso en el proceso de SANI.

2. Con la realización de los tratamientos térmicos a las temperaturas de 450°C, 500°C y 550°C, se observó la evolución de la microestructura y el crecimiento en el tamaño de grano de cada material. Se puede mencionar que la temperatura de 450°C, presentó en las muestras el mayor crecimiento en el grano, posteriormente se mantuvo en ese tamaño y/o incremento.
3. La dureza obtenida en las muestras indicó que para el proveedor de “Reynosa” la dureza era mayor que los otros proveedores debido a la diferencia en la composición química en especial el contenido de Mg, por lo tanto, las cargas y esfuerzos que pueden soportar durante el proceso de conformado son diferentes y mucho menores en las muestras de “Fuzhao” y “Malasia”.
4. Debido a las diferencias en la composición química de los materiales, los rollos de lámina de aluminio tienen diferentes propiedades mecánicas, por lo tanto, los continuos ajustes que se realizan a las máquinas SANI es debido a que cada que ingresa un rollo de aluminio al proceso los ajustes en las fuerzas y esfuerzos para causar la deformación necesaria es diferente. Se tiene que realizar por parte de la empresa una estandarización en el tipo y propiedades del material que seleccionan para este proceso.
5. El análisis de los proveedores tanto en propiedades mecánicas, evolución de tamaño de grano y presencia de las deformaciones en los *slats* de aluminio se llega a la conclusión que el mejor tratamiento para los proveedores son; El proveedor de Reynosa presentó los mejores resultados en sus propiedades mecánicas con un tratamiento térmico de recocido a 500°C con un tiempo de permanencia de 120 minutos y un tamaño promedio de grano de 14 μm , para el proveedor de Malasia su propiedad mecánica más favorable se presentó en la temperatura de 450°C con un tiempo de permanencia de 60 min y un tamaño promedio de grano de 12 μm y para el proveedor de Fuzhao los resultados indicaron una alta maleabilidad con el tratamiento térmico de recocido de 500°C con un tiempo de permanencia de 60 min y un tamaño promedio de grano de 19 μm .

Bibliografía

- [1]. G. Urbina, M.Cruz, I. Vázquez, G. Baca, J. Gutiérrez, A. Pacheco, Á. Rivera, I. Rivera, M. Obregón, “introducción a la ingeniería industrial”, Grupo Editorial Patria, S.A. De C.V., Segunda edición ebook, México, 2014.
- [2]. M. Raffino. "industria", Concepto.de (12 de marzo de 2020) [En línea]. Disponible en: <https://concepto.de/industria/>.
- [3]. M. Raffino. "Manufactura", Concepto.de, (26 de febrero de 2020) [En línea]. Disponible en: <https://concepto.de/manufactura/>.
- [4]. Mike`s window Decorating Blog, “A Brief History of How Todays Blinds and Shades Came to Be” (september 18 2014) [En línea]. Disponible en: <https://www.blindsonline.com/blog/brief-history-todays-blinds-shades-came/>
- [5]. M. González, "Nuevo método de evaluación de categorías para operadores del proceso de corte y ponche de tablillas caso Springs Window Fashions de Victoria", Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de ciudad Victoria, ciudad Victoria, Tamaulipas, 2015
- [6]. Springs Window Fashions the Best Experience Company. (2017). Springs Window Fashions. [En línea]. Disponible en:<http://www.springswindowfashions.com/about/Pages/default.aspx>
- [7]. M. Borruto, (2013), “Residuos, Rezagos y Scraps de productos electrónicos afectados al régimen de la ley de promoción económica 19640”, [En línea]. Disponible en:https://www.academia.edu/16953080/SCRAPS_RESIDUOS_Y_REZAGOS
- [8]. L. Andrade, “Análisis de variaciones de uso de material y cálculo de scrap estándar en los procesos de ensamblaje y empaque en una planta de productos de afeitado”, usando la filosofía, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela, 2006
- [9]. C. M. Rudy, “El Aluminio Aspectos Generales”, Curso Introductorio – Tecnología Del Aluminio, pp 1-75, 2007.
- [10]. G. Jerson. Aleaciones El Aluminio, universidad nacional de Colombia, Colombia.
- [11]. E. L. Rooy, “ASM Handbook: properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials”, ASM Handbook Committee, vol. 2, United States of America, 1990, pp. 14-723.

- [12]. R. E. R. Marco Antonio, G. R., Carlos Gamaliel y M. S. Roberto, "El aluminio, material trascendente en la historia humana", Temas de Ciencia y Tecnología, vol. 21 número 61, pp 3 - 9. Enero-Abril 2017
- [13]. "Tipos de aluminio. Clases de aluminio según aleación", Termister plataformas y andamios. (2016, Marzo 18). [En línea]. Disponible en: <https://www.termiser.com/tipos-de-aluminio-clases-de-aluminio-segun-aleacion/>
- [14]. "Unidad 13 Aleaciones para ingeniería" Universidad Politécnica de Valencia. (2017). [En línea]. Disponible en: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13_4.html
- [15]. O. Salvador, "Manual del Aluminio y sus Aleaciones" Blog Ingenieria de Materiales (2009, Abril, 17). [En línea]. Disponible en: <https://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/04/17/manual-del-aluminio-y-sus-aleaciones/>
- [16]. "Aleaciones" Aludium. [En línea]. Disponible en: <https://aludium.com/es/proceso/aleaciones/>
- [17]. M. Edgar, "Laminado" (2015 Oct. 13). [presentación en slideshare] [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/EdgarMartinez13/que-es-el-proceso-laminado>
- [18]. E. José, T. G. Enrique, E. B. Susana, F. S. Daniel. Laminación. Madrid 2010.
- [19]. "Capitulo 5 Laminación" UNAM, [En línea]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/2548/8/08-MPM-Cap5-Final.pdf>
- [20]. "Laminación en frio" Ingeteam Power Technology S.A. (2010), [En línea]. Disponible en: https://www.ingeteam.com/es-es/sistemas-industriales/siderurgia/pc38_59_500/laminacion-en-frio.aspx
- [21]. H. Chandler, "Heat treat'r guide Practices and Procedures for Nonferrous Alloys", ASM International, Tercera edición, United States of America, pp. 669, tercera impresion, Marzo 2006.

- [22]. Z. Keran, M. Mihaljević, B. Runje, D. Markučič. “Ultrasonic testing of grain distortion direction in cold formed aluminium profile”, Elsevier, archives of civil and mechanical engineering, vol. 17, pp. 375-381, 21 abril 2016.
- [23]. M. K. Hingwe, “ASM Handbook: Heat Treating”, ASM Handbook Committee, vol. 4, United States of America, 1991, pp. 102-160 y pp 841-879.
- [24]. “Recocido / Normalizado”, Bodycote plc., (2018). [En línea]. Disponible en: <https://www.bodycote.com/es/servicios/tratamiento-termico/annealing-normalising/>
- [25]. H. E. Boyer, “Heat Treating of Nonferrous Alloys”, American Society for Metals 1984, pp. 190-95, 2013.
- [26]. “Tema 3 Defectos en la estructura cristalina”, UCA, (2003). [En línea]. Disponible en: <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2003.pdf>
- [27]. “Tema 11 Endurecimiento por deformación plástica en frío. Recuperación Recristalización y crecimiento de grano”, UCA, (2011). [En línea]. Disponible en: <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2011.pdf>
- [28]. P. U. Javier, F. S. Jaime, S. S. Alberto. “Recristalización de bandas de aluminio procedentes de colada continua, laminadas en frío”, Metal Madrid, vol. 36 pp. 435-451, septiembre 2000.
- [29]. B. Gabriel, “Estructuras Cristalinas: Estructuras Tipos y Ejemplos” lifeder.com. [En línea]. Disponible en: <https://www.lifeder.com/estructura-cristalina/>
- [30]. S. M. Adrián, “Capítulo 2 Defectos lineales: Dislocaciones”, Biblioteca de ingeniería Universidad de Sevilla. [En línea]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4691/fichero/Volumen+I%252F2-Defectos+lineales+Dislocaciones.pdf>
- [31]. P. Antonio, “Estructura cristalina” Aprendemos Tecnología. (2011). [En línea]. Disponible en: <https://aprendemostecnologia.org/2011/09/18/estructura-cristalina/>
- [32]. G. E. Miguel, “Tipos de Estructuras Cristalinas” Prezi. (2014). [En línea]. Disponible en: <https://prezi.com/vszk341jeic3/tipos-de-estructuras-cristalinas/>

- [33]. Universidad de Santiago de Chile "Capítulo 18 sólidos cristalinos", departamento de ingeniería en metalurgia, 2003.
- [34]. A. S. Julio, "Estructuras Cristalinas" recursosbiblio. (2013). [En línea]. Disponible en: http://recursosbiblio.url.edu.gt/Libros/2013/cmI/3-Estructuras_Cristalinas.pdf
- [35]. "Structures of Metals" Material Science & Technology from University of Washington (1999). [En línea]. Disponible en: https://depts.washington.edu/matseed/mse_resources/Webpage/Metals/metalstructure.htm
- [36]. "Aleaciones de aluminio", Meyer aluminium blanks, inc. (2006). [En línea]. Disponible en: <https://www.meyer-mab.com/recursos/informacion-tecnica/?lang=es>
- [37]. A. Fortini, M. Merlin, E. Fabbri, S. Pirletti, G. Luca Garagnani, "On the influence of Mn and Mg additions on tensile properties, microstructure and quality index of the A356 aluminum foundry alloy" Structural Integrity Procedia, pp 2-8, 20-24 June 2016.
- [38]. H. Girisha, Dr. K. Sharma, "Effect of magnesium on strength and microstructure of Aluminium Copper Magnesium Alloy", International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 3, pp. 1-4 Febrero 2012.
- [39]. A. G. Kulkarni & I. Gurrappa, "Effect of magnesium addition on surface free energy and anode capacity of indium activated aluminium alloys" British Corrosion Journal, vol. 28, pp. 67-70, 1993
- [40]. P. Ebenberger, J. Uggowitzer, B. Gerold and S. Pogatscher, "Effect of Compositional and Processing Variations in New 5182-Type AlMgMn Alloys on Mechanical Properties and Deformation Surface Quality", Materials, MDPI journal, vol. 12, pp 1-21, Mayo 2019
- [41]. K. G. Alarcón, "Caracterización de deformaciones mecánicas usando correlación digital de imágenes", Universidad San Francisco De Quito USFQ, trabajo de titulación, diciembre 2015

- [42]. A. J. Heredia, “Análisis Numérico Del Conformado Plástico Por Estirado Aplicado A Recubrimientos De Aeronaves”, Universidad Nacional de Córdoba, trabajo de titulación, octubre 2015
- [43]. S. Morin, E. Elgallad, H. Doty, S. Valtierra, and F. Samuel, “Effect of Mg Content and Heat Treatment on the Mechanical Properties of Low Pressure Die-Cast 380 Alloy”, *Advances in Materials Science and Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, volume 2016, pp 12, septiembre 2016
- [44]. P. Ouellet, F. Samuel, “Effect of Mg on the ageing behaviour of Al-Si-Cu 319 type aluminium casting alloys” *journal of materials science*, vol. 34, pp. 4671-4697, 1999
- [45]. J. A. Taylor “The Effect of Iron in Al-Si Casting Alloys” Cooperative Research Centre for Cast Metals Manufacturing (CAST) The University of Queensland Brisbane, pp. 1-10, October 2004.
- [46]. W. Jinliana, Xu Junb, P. Feng, “Effect of annealing on microstructure and properties of Er modified 5052 alloy”, *Results in Physics*, vol. 10, pp. 476-480, 23 June 2018
- [47]. B. Wang, X. Chen, F. Pan, J. Mao, Y. Fang, “Effects of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of AA 5052 aluminum alloy”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 25, pp. 2481-2489 14 April 2015.
- [48]. J. Liua, J. G. Morris, “Recrystallization microstructures and textures in AA 5052 continuous cast and direct chill cast aluminum alloy”, Published by Elsevier B.V, *Material Science and Engineering A*, vol. 385 pp. 342-35., 21 June 2004.
- [49]. J. Zhang, J. Zhao and R. Zuo, “Investigation on the homogenization annealing treatment of 5052-based aluminum alloys”, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences* Vol. 24, pp. 57-62, 19 January 2017.
- [50]. Q. Guo, X. Lei, R. E. Sanders, Jr., X. Yang, Y. Liang, Lu Wang y Z. Fan, “Effect of Annealing Conditions on Recrystallization of AA5182 Sheet”, *Materials Science Forum*, ISSN: 1662-9752, Vol. 877, pp 264-271, 2016
- [51]. L.Y. Zhang, Y.H. Jiang, Z. Ma, S.F. Shan, Y.Z. Jia, C.Z. Fan, W.K. Wang, “Effect of cooling rate on solidified microstructure and mechanical properties of aluminium-A356 alloy”, *Journal of materials processing technology*, vol. 207, pp, 107–111, 2008.

- [52]. M. R. Galán, “Técnicas de Obtención de Grano Metalográfico en el Rango Milimétrico y Centimétrico Mediante Diversos Tratamientos Térmicos y Mecánicos”, Proyecto Fin de Carrera, 8 de julio de 2007.
- [53]. H. Kim, C. Kang, M. Huha, and O. Engler, “Effect of primary recrystallization texture on abnormal grain growth in an aluminum alloy”, *Scripta Materialia*, vol. 57 pp.325-327, 23 May 2007.
- [54]. H. G. Suk, E. J. Shin, and M. Y. Huh, “Development of Abnormal Grain Growth in Cold Rolled and Recrystallized AA 5182 Sheet”, *Solid State Phenomena*, Vols. 116-117, pp 316-319, 15 Oct 2006.
- [55]. T. Radetic, M. Popovic, E. Romhanji, “Influence of Cold-Rolling Deformation and Annealing Temperature on The Grain Growth of Al-4%Mg-Mn Alloy”, *Materials and technology* 54, vol. 1, pp 85-90, Feb 2020.
- [56]. K. Li, T. Zou, D. Li, Y. Peng, y Da Shu “On Formation of Abnormally Large Grains in Annealing Prestrained Aluminum Alloy Multiport Extrusion Tubes”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 50 pp. 5734-5749 Sep. 2019.
- [57]. P.A. Beck y P.R. Sperry, “Strain Induced Grain Boundary Migration in High Purity Aluminum” *J. Appl. Phys*, vol. 21 (2), pp. 150–152, 1950.
- [58]. S. S. Entezami, M. Honarpisheh, “A Study on the Hardness of 7075 and 5052 Aluminum Alloys in the Equal Channel Angular Rolling Process”, *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, Vol 85, p. 879 – 889, 2016.
- [59]. E. G. Maffia, “Aluminio y sus aleaciones”, *Estructura y Propiedades de las Aleaciones*, 2013.
- [60]. J. Unfried-Silgado, J. López del Río, D. Machuca Vargas, E. Pérez Caicedo, Carlos Z. Pinedo y E. E. Niebles Núñez, “Efectos de la aplicación de tratamientos isotérmicos sobre el tamaño de grano y la dureza de aleaciones de aluminio AA5083-H116”, *REVISTAMATERIA*, Vol. 22, 2016
- [61]. T. Beck. (2004, septiembre) *Springs Window Fashions* official (manual).
- [62]. ASTM E1382-97(2015), *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org

- [63]. H. Baker, "ASM Handbook: *Alloy Phase Diagrams*", ASM Handbook Committee, vol. 3, United States of America, 1992, pp. 1505-1550.

ANEXOS 1



Laboratorio de ANALISIS QUIMICO

Responsable	TECNOLOGICO CD VICTORIA	FECHAS	
Solicitante	Dr. Ricardo López García	Solicitud	31/05/2019
Dirección	, Col. , ,	Entrega	11/06/2019

INFORME DE RESULTADOS

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)					
Si	0.039				
Fe	0.162				
Cu	0.012				
Mn	0.3710				
Mg	4.7600				
Cr	0.050				
Ni	0.0014				
Zn	0.005				
Ti	0.0053				
Co	<0.0005				
Sr	0.0009				
V	0.0132				

MÉTODO DE ANÁLISIS:

Las muestras fueron analizadas por Espectrometría de Emisión Óptica por Chispa, para lo cual se utilizó un equipo Marca SPECTRO modelo LAB 5.

ESTE ANALISIS CORRESPONDE A LA MUESTRA PRESENTADA POR EL CLIENTE Y NO AVALA EL MUESTREO NI LA PROCEDENCIA DE LA MISMA
ESTE INFORME NO PODRA SER REPRODUCIDO PARCIALMENTE SIN LA APROBACION POR ESCRITO DEL LABORATORIO

Analistas: García Guillermo María del Socorro

Vb. So.

LIC. ANA CARMEN FUENTES RAMOS

LIC. MA. DEL SOCORRO GARCIA GUILLERMO



Laboratorio de ANALISIS QUIMICO

Responsable García Pastor Francisco Alfredo
Solicitante Omar Alejandro Velázquez Carrillo
Dirección Carr. Mty-Saltillo Km 13, Ramos Arizpe, Coah.

FECHAS
Solicitud 09/10/2019
Entrega 15/10/2019

INFORME DE RESULTADOS

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)					
	FUZHAO	TYORK			
Si	0.083	0.164			
Fe	0.216	0.205			
Cu	<0.0001	0.017			
Mn	0.004	0.035			
Mg	2.59	2.62			
Cr	0.175	0.198			
Ni	0.003	0.005			
Zn	0.006	0.017			
Ti	0.017	0.042			
Co	0.002	0.002			
Sr	<0.0001	<0.0001			
V	0.005	0.015			

MÉTODO DE ANÁLISIS:
Las muestras fueron analizadas por Espectrometría de Emisión Óptica por Chispa, para lo cual se utilizó un equipo Marca SPECTRO modelo LAB 5.

ESTE ANALISIS CORRESPONDE A LA MUESTRA PRESENTADA POR EL CLIENTE Y NO AVALA EL MUESTREO NI LA PROCEDENCIA DE LA MISMA
ESTE INFORME NO PODRA SER REPRODUCIDO PARCIALMENTE SIN LA APROBACION POR ESCRITO DEL LABORATORIO

Analistas: Berlanga Alvarado Norma Alicia

Vó. So.
LIC. ANA CARMINA FUENTES RAMOS

LIC. MA. DEL SOCORRO GARCIA GUILLERMO

ASM Metals Handbook Volume 2 - Properties and Selection Nonferrous Materials.pdf - Adobe Reader

Archivo Edición Ver Documento Herramientas Ventana Ayuda

56 / 3470 75% Buscar

Marcadores

- Nonferrous Alloys and
 - Publication Information and Contributors
 - Specific Metals and Alloys
 - Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys
 - Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum and Aluminum Alloys
 - Aluminum Mill and Engineered Wrought Products
 - Properties of Wrought Aluminum and Aluminum Alloys
 - Aluminum Foundry Products
 - Properties of Cast Aluminum Alloys
 - Aluminum-Lithium Alloys
 - High-Strength Aluminum Powder Metallurgy Alloys
 - Introduction to

Grade designation			Composition, wt%													Unspecified other element			
5251	...	AD4p2	0.40	0.50	0.15	0.10-0.50	1.7-2.4	0.15	...	0.15	...	...	...	...	0.15	0.05	0.15	max	
5351	A95351	...	0.08	0.10	0.10	0.10	1.6-2.2	...	...	0.05	...	0.05	...	...	...	0.05	0.10	max	
5451	A95154	AD4p3.5	0.25	0.40	0.10	0.10	1.8-2.4	0.15-0.35	0.05	0.10	...	...	...	...	0.05	0.05	0.15	max	
5052	A95052	AD4p2.5	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2-2.8	0.15-0.35	0.10	...	...	...	...	...	0.05	0.15	max		
5252	A95252	...	0.08	0.10	0.10	0.10	2.2-2.8	...	...	0.05	...	0.05	...	...	...	0.05	0.10	max	
5352	A95352	...	0.45 (Si + Fe)		0.10	0.10	2.2-2.8	0.10	...	0.10	...	...	...	...	0.10	0.05	0.15	max	
5552	A95652	...	0.04	0.05	0.10	0.10	2.2-2.8	...	...	0.05	...	0.05	...	...	...	0.05	0.10	max	
5652	A95652	...	0.40 (Si + Fe)		0.04	0.01	2.2-2.8	0.15-0.35	...	0.10	...	...	...	...	...	0.05	0.15	max	
5154	...	AD4p3.5	0.25	0.40	0.10	0.10	3.1-3.9	0.15-0.35	...	0.20	...	...	...	...	0.20	0.05	0.15	max	

ASM Metals Handbook Volume 2 - Properties and Selection Nonferrous Materials.pdf - Adobe Reader

Archivo Edición Ver Documento Herramientas Ventana Ayuda

58 / 3470 75% Buscar

Marcadores

- Nonferrous Alloys and
 - Publication Information and Contributors
 - Specific Metals and Alloys
 - Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys
 - Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum and Aluminum Alloys
 - Aluminum Mill and Engineered Wrought Products
 - Properties of Wrought Aluminum and Aluminum Alloys
 - Aluminum Foundry Products
 - Properties of Cast Aluminum Alloys
 - Aluminum-Lithium Alloys
 - High-Strength Aluminum Powder Metallurgy Alloys
 - Introduction to

Grade designation			Composition, wt%													Unspecified other element			
5356	A95356	...	0.25	0.40	0.10	0.50-1.0	4.7-5.5	0.05-0.20	...	0.25	...	...	...	...	0.05-0.20	0.05	0.15	max	
5357	A95357	...	0.12	0.17	0.20	0.15-0.45	0.8-1.2	...	...	0.05	...	...	...	...	...	0.05	0.15	max	
5457	A95457	...	0.08	0.10	0.20	0.15-0.45	0.8-1.2	...	...	0.05	...	0.05	...	...	...	0.05	0.10	max	
5557	A95557	...	0.10	0.12	0.15	0.30-0.40	0.40-0.8	...	...	...	...	0.05	...	...	...	0.05	0.10	max	
5657	A95657	...	0.08	0.10	0.10	0.05	0.6-1.0	...	...	0.05	0.05	0.05	...	...	...	0.02	0.05	max	
5280	...	...	0.55 (Si + Fe)		0.10	0.20-0.7	3.5-4.5	0.05-0.25	...	1.5-2.8	...	...	...	...	...	0.05	0.15	max	
5082	A95082	...	0.20	0.35	0.15	0.15	4.0-5.0	0.15	...	0.25	...	...	...	...	0.10	0.05	0.15	max	
5182	A95182	...	0.20	0.35	0.15	0.20-0.50	4.0-5.0	0.10	...	0.25	...	...	...	...	0.10	0.05	0.15	max	
5083	A95083	AD4p4.5Ma	0.40-0.7	0.40	0.10	0.40-0.10	4.0-4.9	0.05-0.25	...	0.25	...	...	...	...	0.15	0.05	0.15	max	

ANEXOS 2



Conversion Hrc-Hv-Hrb-N/mm² - Kg/mm²

N/mm ²	Kgf/mm ²	HV	HRC	HRB	N/mm ²	Kgf/mm ²	HV	HRC	HRB
255	26	80	-	-	900	91,8	280	27,1	-
270	27,5	85	-	41	915	93,3	285	27,8	-
285	29,1	90	-	48	930	94,9	290	28,5	-
305	31,1	95	-	52	950	96,9	295	29,2	-
320	32,6	100	-	56	965	98,4	300	29,8	-
335	34,2	105	-	59	995	101,5	310	31	-
350	35,7	110	-	62	1030	105,1	320	32,2	-
370	37,7	115	-	65	1060	108,1	330	33,3	-
385	39,3	120	-	67	1095	111,7	340	34,4	-
400	40,8	125	-	70	1125	114,8	350	35,5	-
415	42,3	130	-	71	1155	117,8	360	36,6	-
430	43,9	135	-	73	1190	121,4	370	37,7	-
450	45,9	140	-	75	1220	124,5	380	38,8	-
465	47,4	145	-	77	1255	128	390	39,8	-
480	49	150	-	79	1290	131,6	400	40,8	-
495	50,5	155	-	80	1320	134,7	410	41,8	-
510	52	160	-	82	1350	137,7	420	42,7	-
530	54,1	165	-	83	1385	141,3	430	43,6	-
545	55,6	170	-	85	1420	144,9	440	44,5	-
560	57,1	175	-	86	1455	148,4	450	45,3	-
575	58,7	180	-	87	1485	151,5	460	46,1	-
595	60,7	185	-	88	1520	155,1	470	46,9	-
610	62,2	190	-	90	1555	158,8	480	47,7	-
625	63,8	195	-	91	1595	162,7	490	48,4	-
640	65,3	200	-	92	1630	166,3	500	49,1	-
660	67,3	205	-	93	1665	169,9	510	49,8	-
675	68,9	210	-	94	1700	173,4	520	50,5	-
690	70,4	215	-	94	1740	177,5	530	51,1	-
705	71,9	220	-	95	1775	181,1	540	51,7	-
720	73,5	225	-	96	1810	184,7	550	52,3	-
740	75,5	230	-	97	1845	188,2	560	53	-
755	77	235	-	97	1880	191,8	570	53,6	-
770	78,6	240	20,3	98	1920	195,9	580	54,1	-
785	80,1	245	21,3	99	1955	199,4	590	54,7	-
800	81,6	250	22,2	100	1995	203,5	600	55,2	-
820	83,7	255	23,1	-	2030	207,1	610	55,7	-
835	85,2	260	24	-	2070	211,2	620	56,3	-
850	86,7	265	24,8	-	2105	214,8	630	56,8	-
865	88,2	270	25,6	-	2145	218,8	640	57,3	-
880	89,8	275	26,4	-	2180	222,4	650	57,8	-