



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Posgrado
Maestría en Ciencias (Estructuras)

“Estudio de la modificación del aluminio reciclado con NTC para su aplicación estructural”.

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Alma Rosa Zamudio Méndez

Dirigido por:

Dra. Karen Esquivel Escalante

Dra. Karen Esquivel Escalante
Presidente

M. en C. Martha Elva Pérez Ramos
Secretario

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Vocal

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Suplente

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras
Suplente



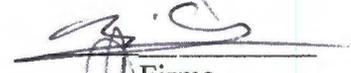
Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad



Firma



Firma



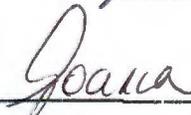
Firma



Firma



Firma



Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Junio, 2017.

RESUMEN

Es vital para nosotros, como generación, proveer soluciones ambientales que integren la tecnología y la reutilización de materiales de desecho. Esta investigación indaga en un compuesto hecho con aluminio reciclado de latas de bebidas combinadas con nanotubos de carbono para proporcionar propiedades estructurales para su uso en el sector de la construcción.

En el año 2014, la Secretaría de Energía de México (SENER) declaró un consumo nacional de energía de 8,624.26 PJ, de los cuales casi el 20% se debió a las industrias, involucrando la producción de acero y hierro. A partir de información de esta clase, se plantearon las para estudiar un material alternativo con un menor daño ambiental.

La relación de alta resistencia y peso del aluminio ha sido muy útil en las áreas de construcción, aeroespacial y automotriz, además, el aluminio requiere alrededor de 168 GJ / T para ser producido a partir del mineral Al_2O_3 pero sólo 7 GJ / T para producir la misma cantidad de chatarra.

Incluso cuando el aluminio muestra cualidades de resistencia a la corrosión, no es un material utilizado con fines estructurales. Por lo tanto, muchos experimentos recientes han demostrado los beneficios de la adición de nanotubos en la matriz de aluminio dando al metal una mayor capacidad de carga y mejoramiento de la resistencia a la fatiga.

Con porcentajes en volumen de 0,0075%, 1,5% y 3,0% de nanotubos de carbón paredes múltiples dispersos en aluminio fundido, se obtienen diferentes propiedades mecánicas en ensayos de tracción, compresión y microdureza. Además de las propiedades químicas y microestructurales mostradas en microscopía electrónica de barrido y de transmisión.

Las propiedades de resistencia mecánica tales como el módulo de elasticidad y la resistencia real obtenida de estos ensayos se introducen en un software estructural para realizar y analizar su posible uso como material estructural.

Palabras clave: aluminio reciclado, compuesto, nanotubos de carbono, estructuras, propiedades mecánicas, acero.

SUMMARY

It is vital, for us as generation to provide environmental solutions that integrates technology and reuse of waste materials. This investigation inquires in a composite made with recycled aluminum from beverage cans alloy with carbon nanotubes to provide structural properties for its use in the construction sector.

In 2014, de Mexican Energy Secretary declared a 8,624.26 PJ of national energy consumption from where almost 20% produced by the industry, involving the Steel and iron production, setting the concern of studying an alternate material with a lower ambient damage. Aluminum's high strength-weight ratio has been very useful in the construction, aerospace and automotive areas besides, aluminum requires about 168 GJ/T to be produced from the mineral Al_2O_3 but only 7 GJ/T to produce the same amount from scrap.

Even when aluminum shows corrosion resistance qualities, isn't a material used for structural purposes. Therefore, many recent experiments have shown the benefits of the addition of nanotubes in the aluminum matrix giving to the metal higher load capacity and fatigue resistance improvement.

Percentages of volume of 0.0075%, 1.5% and 3.0% of multiwalled carbon nanotubes dispersed in melted aluminum waste cans, provides different mechanical properties in tensile, compressive and microhardness tests. As well as chemical properties showed in scanning electron microscopy, microstructure and transmission electron microscopy.

Mechanical resistance properties such as elastic modulus and real strength obtained from these test are introduced in a structural software to realize and analysis of its use as a structural material.

Key words: recycled aluminum, composite, carbon nanotubes, structures, mechanical properties, steel.

DEDICATORIA

Dedicado a todas las personas que creen que es posible construir un mundo donde las personas, las ideas y la madre Tierra seamos libres.

A mis padres y a mi hermana, siempre.

A mis compañeros de la maestría por los buenos ratos en el cubo.

A todos mis profesores por sus enseñanzas y paciencia.

A mi asesora por creer en mí.

A mi coasesora por su gran paciencia y por todo lo aprendido de usted.

A todos los técnicos de los laboratorios de Metalmecánica del ITQ de Metalurgia del CINVESTAV por su infinita disposición y ayuda.

A mis amigos por sus ánimos y buenas vibras.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado durante estos dos años de investigación.

A mi Universidad Autónoma de Querétaro y sobre todo a mi facultad de Ingeniería por permitirme seguir siendo parte de ella.

Al Instituto Tecnológico de Querétaro por abrirme las puertas a sus aulas y laboratorios sin los que esto no hubiera podido suceder.

ÍNDICE

RESUMEN.....	2
SUMMARY	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS	5
1 INTRODUCCIÓN	16
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	17
1.2 JUSTIFICACIÓN	20
1.3 HIPÓTESIS	22
1.4 OBJETIVOS	22
1.4.1 OBJETIVO GENERAL:.....	23
1.4.2 PARTICULARES:	23
2 REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	24
2.1 ANTECEDENTES.....	24
2.2 MARCO TEÓRICO.....	25
2.2.1 MATERIALES COMPUESTOS.....	25
2.2.2 INTERFASE MATRIZ-REFORZANTE	28
2.2.2.1 Propiedades elásticas en compuestos reforzados con fibras	29
2.2.2.2 Anisotropía.....	38
2.3 ALUMINIO EN LA CONSTRUCCIÓN	39
2.4 ALUMINIO Y SU RECICLAJE	45

2.4.1	FATIGA EN EL ALUMINIO.....	48
2.4.2	FUNDICIÓN DE ALUMINIO.....	50
2.5	NANOTUBOS DE CARBONO.	51
2.5.1	MÉTODOS DE SÍNTESIS DE NANOTUBOS:	52
2.5.1.1	Descarga de arco.....	53
2.5.1.2	Ablación Laser	53
2.5.1.3	Deposición química de vapor.....	54
2.6	COMPOSITOS AL-NTC.....	56
2.7	TEOREMAS ESPECIALES APLICABLES A LAS ARMADURAS.....	61
2.8	IMPORTANCIA DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN UN MATERIAL	62
3	<u>METODOLOGÍA.....</u>	64
3.1	MATERIAL Y EQUIPO	64
3.2	RECICLAJE, LIMPIEZA, DESLACADO Y CORTE DE LATAS DE ALUMINIO.	65
3.3	FUNDICIÓN DEL ALUMINIO RECICLADO RECUPERADO Y FORMACIÓN DEL COMPOSITO AL-NTC	66
3.4	ELABORACIÓN DE PROBETAS	69
3.5	CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL ALUMINIO RECICLADO Y DEL COMPOSITO AL-NTC	70
3.6	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL ALUMINIO Y DEL COMPOSITO AL-NTC.....	70
3.7	PRUEBA DE DUREZA DE VICKERS	70
3.8	MÓDULO ELÁSTICO Y LÍMITES DE FLUENCIA	71
4	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	73
4.1	RECICLAJE, LIMPIEZA, DESLACADO Y CORTE DE LATAS DE ALUMINIO.....	73
4.2	FUNDICIÓN DEL ALUMINIO RECICLADO RECUPERADO Y FORMACIÓN DEL COMPOSITO AL-NTC	74
4.3	ELABORACIÓN DE PROBETAS	76
4.4	CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL ALUMINIO RECICLADO Y DEL COMPOSITO AL-NTC	76
4.4.1	SEM Y EDS EN ESCORIA DE AL RECICLADO.....	76
4.4.2	SEM Y EDS EN ESCORIA DE COMPOSITO AL-0.05%V NTC7.....	78

4.4.3	SEM EN ESCORIA DE COMPOSITO AL-1.5%V NTC	80
4.4.4	SEM EN ESCORIA DE COMPOSITO AL-3.0%V NTC	82
4.5	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL ALUMINIO Y DEL COMPOSITO AL-NTC.....	83
4.6	PRUEBA DE DUREZA DE VICKERS	94
4.7	MÓDULO ELÁSTICO Y LÍMITES DE FLUENCIA	95
4.8	ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL	111
4.8.1	MARCO.....	111
4.8.2	CERCHA	116
5	<u>CONCLUSIONES.....</u>	123
6	<u>REFERENCIAS</u>	127
7	<u>APÉNDICE</u>	131
7.1	ARTÍCULOS PUBLICADOS	131
7.2	ABSTRACT PARA PÓSTER	142
7.3	CONSTANCIAS DE PARTICIPACIÓN	144
	.....	146
	.....	148
7.4	TABLAS COMPLETAS DEL ANÁLISIS DE CERCHA	150

TABLAS

Tabla 1. Uso de aluminio en el mundo.....	41
Tabla 2. Resistencia específica y costo de aleaciones no ferrosas (Askeland,2005).....	42
Tabla 3. Propiedades que afectan el desempeño estructural de los metales.....	44
Tabla 4. Comparación de tres metales comunes de uso estructural	44
Tabla 5. Propiedades de los nanotubos por tres métodos (González & González, 2008)..	54
Tabla 6. Dimensiones para probetas de prueba a tensión de acuerdo a la norma E8 de la ASTM.....	70
Tabla 7. Peso de latas completas.	73
Tabla 8. Peso de latas preparadas para fundición	73
Tabla 9. Peso de aluminio antes y después de fundirse.....	74
Tabla 10. Peso de latas preparadas para fundición	74
Tabla 11. Volumen de lingotes obtenidos	75
Tabla 12. Tabla de concentraciones de EDS en primera fundición de Al reciclado	77
Tabla 13. Concentraciones de elementos encontrados en EDS de escoria de compuesto Al-0.05%VNTc.....	79
Tabla 14. ASM Aluminum Alloy Casting, de Composición Nominal y Límite de Aleaciones de Aluminio Fundido.(Basado en manuales industriales, la notable Aluminum Association Standars for Sand and Permanent Mold Castings y la Aluminum Association Registration Sheet for Alloys in the Form of Casting and Ingot)	86
Tabla 19. Resultados obtenidos para pruebas de microdureza de Vickers y su equivalencia en esfuerzo a la tensión de acuerdo de tablas de conversión de para durezas.....	95
Tabla 15. Propiedades mecánicas para aluminio reciclado sin ningún porcentaje de nanotubos de carbono obtenidos en ensaye de tensión.	102
Tabla 16. Propiedades mecánicas para aluminio reciclado con 0.007%V de nanotubos de carbono de paredes múltiples obtenidos en ensayo de tensión.....	103
Tabla 17. Propiedades mecánicas para aluminio reciclado con 1.5%V de nanotubos de carbono de paredes múltiples obtenidos en ensaye de tensión.....	104

Tabla 18. Propiedades mecánicas para aluminio reciclado con 3.0%V de nanotubos de carbono de paredes múltiples obtenidos en ensaye de tensión.	104
Tabla 20. Valores promedio de propiedades mecánicas obtenidos en ensaye a tensión de distintos porcentajes de ntc en probetas de aluminio reciclado.	106
Tabla 21. Porcentaje de criterios de aumento en los valores de propiedades mecánicas según porcentaje de ntc.	107
Tabla 22. Valores obtenidos en prueba de compresión para 1.5%V de nanotubos de carbono en matriz de aluminio reciclado.	108
Tabla 23. Valores obtenidos en prueba de compresión para 3.0%V de nanotubos de carbono en matriz de aluminio reciclado.	110
Tabla 24. Tabla obtenida de SAP2000. Propiedades mecánicas proporcionadas al aluminio.	114
Tabla 25. Tabla obtenida de SAP2000. Diseño de Aluminio (Resumen de Datos -AA-LRFD-2000).	114
Tabla 26. Tabla obtenida de SAP2000. Esfuerzos en cada elemento debido a las cargas actuantes.	114
Tabla 27. Tabla obtenida de SAP2000. Reacciones en articulaciones.	115
Tabla 28. Tabla obtenida de SAP2000. Desplazamientos en uniones de elementos debido a las cargas.	115
Tabla 29. Tabla obtenida de SAP2000. Control del Software.	116
Tabla 30. Tabla obtenida de SAP2000. Propiedades mecánicas proporcionadas al aluminio.	120
Tabla 31. Tabla obtenida de SAP2000. Resumen de Datos para el diseño de Aluminio en algunos elementos representativos. Para una vista completa, revisar anexos.	120
Tabla 32. Tabla obtenida de SAP2000. Esfuerzos en algunos elementos representativos. Para una vista completa, revisar anexos.	121
Tabla 33. Tabla obtenida de SAP2000. Reacciones en articulaciones.	121

Tabla 34. Tabla obtenida de SAP2000. Desplazamientos en primeros nodos. Para una vista completa, revisar anexos.....	122
Tabla 35. Tabla obtenida de SAP2000. Control del Software.....	122
Tabla 36. Tabla obtenida de SAP2000. Diseño de Aluminio (Resumen de Datos -AA-LRFD-2000).....	150
Tabla 37. Tabla obtenida de SAP2000. Esfuerzos en cada elemento debido a las cargas actuantes	158
Tabla 38. Tabla obtenida de SAP2000. Desplazamientos en uniones de elementos debido a las cargas.....	168

FIGURAS

Figura 1. Límites superior e inferior del módulo de Young en compuestos reforzados con fibras (Rösler, Harders y Bäker 2007).....	35
Figura 2. Distintos tipos de arreglos en refuerzos con fibras (Hosford, 2007)a) arreglo unidireccional, b) arreglo cuadrado a 90°, c) arreglo aleatorio o cruzado	36
Figura 3. a) Carga paralela al arreglo de fibras dentro de la matriz. b) Dependencia del módulo de Young con la fracción de volumen de la fibra.....	37
Figura 4. a) Carga perpendicular al arreglo de fibras dentro de la matriz. b) Dependencia del módulo de Young con la fracción de volumen de la fibra.....	37
Figura 5. Diagrama de curva esfuerzo-deformación de un polímero reforzado con fibras.	38
Figura 6. Curva S-N para fatiga.	49
Figura 7. Ciclos con amplitud constante de esfuerzo de tensión y compresión.	49
Figura 8. Elemento volumétrico representativo donde se muestra la matriz, la interfase y las paredes múltiples del nanotubo de carbono.....	59
Figura 9. Curva esfuerzo-Deformación en metales dúctiles. a) Metal dúctil sin punto de fluencia aparente, b) Metal dúctil con punto de cedencia aparente.....	62
Figura 10. Proceso de reciclaje y arreglo de latas de aluminio para fundición. a) deslacado, b) retiro de tapas,, c) parte de lata usada para fusión.....	66
Figura 11. a) Frasco de nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT) marca Aldrich. B) proceso de pesado de nanotubos de acuerdo a su porcentaje en volumen. C) solución de nanotubos con acetona. D) Mezclado en sonotrodo. E) pintado de solución con gotero en hojas de aluminio para vertido en horno de crisol. f) resultado final de hojas de aluminio pintadas de nanotubos de carbono con acetona evaporada.	69
Figura 12. Figura ilustrativa de probetas de tensión y compresión de acuerdo a normas ASTM E8 y E9.	69
Figura 13. Diagrama de metodología empleada.....	72

Figure 14. a) Torno donde se maquinaron las probetas, b) Algunas probetas de tensión, c) y d) probetas de compresión.....	76
Figura 15. Microanálisis de escoria en fundición de Al reciclado sin nanotubos de carbono.	78
Figura 16. Mapeo SEM de escoria de Al reciclado.....	78
Figura 17. Microanálisis de escoria en fundición de Al reciclado con 0.05% V de NTC. ..	79
Figura 18. Mapeo SEM de escoria de compuesto Al-0.05% V NTC.....	80
Figura 19. Microanálisis de muestra de Al reciclado con 1.5% V de NTC.	81
Figura 20. Imagen SEM de la superficie de la muestra de Al reciclado con 1.5% V de NTC.	81
Figure 21. Microanálisis de muestra de Al reciclado con 3.0% V de NTC.	82
Figure 22. Imagen SEM de la superficie de la muestra de Al reciclado con 3.0% V de NTC.	83
Figura23. Predicción de valores del módulo de elasticidad del compuesto de acuerdo a la cantidad en volumen de nanotubos carbono.	84
Figure 24. Predicción de valores del Esfuerzo último del compuesto de acuerdo a la cantidad en volumen de nanotubos de carbono.....	85
Figure 25. Predicción de valores del Esfuerzo de Fluencia del compuesto de acuerdo a la cantidad en volumen de nanotubos de carbono.	85
Figura 27. Imagen por microscopio de matriz de aluminio con aglomeraciones de nanotubos de carbono.....	88
Figura 28. Imagen por microscopio de matriz de aluminio con aglomeraciones de nanotubos de carbón y fases A y C dentro de la microestructura.	88
Figura 29. Imagen por microscopio de matriz de aluminio con aglomeraciones de nanotubos de carbón y fase B dentro de la microestructura.	89
Figura 30. Imagen por microscopio de matriz de aluminio con porosidades y fase A y B dentro de la microestructura.	89

Figura 31. Imagen por microscopio de matriz de aluminio con fase C dentro de la microestructura.	90
Figura 32. Diferencia visual entre porosidades y nanotubos de carbono aglomerados dentro de la matriz de aluminio.	91
Figura 33. Predicción de valores del módulo de elasticidad del compuesto de acuerdo a la cantidad en volumen de nanotubos de carbono.	92
Figura 34. Predicción de valores del Esfuerzo de fluencia F_y del compuesto de acuerdo a la cantidad en volumen de nanotubos de carbono.	93
Figura 35. Predicción de valores del Esfuerzo ultimo F_u del compuesto de acuerdo a la cantidad en volumen de nanotubos de carbono.	94
Figura 36. a) Ejemplo de probetas para tensión hechas de aluminio reciclado con nanotubos de carbón, fundido y moldeado en arena, torneado de acuerdo a las dimensiones ante señaladas. b) Probeta en máquina universal sometida a tensión y a quiebre, c) Ruptura en probeta después de ser sometida a tensión.	96
Figura 37. a) Probeta de compresión montada en máquina antes de aplicación de carga. b) probeta después de aplicación de carga. c) probeta deformada luego de ser sometida a carga de compresión.	97
Figura 38. Curva esfuerzo-deformación para probetas de aluminio reciclado sin nanotubos de carbono en prueba de tensión.	98
Figura 39. Curva esfuerzo-deformación para probetas de aluminio reciclado modificado con 0.007% V de nanotubos de carbono de paredes múltiples en prueba de tensión.	99
Figura 40. Curva esfuerzo-deformación para probetas de aluminio reciclado modificado con 1.5% V de nanotubos de carbono de paredes múltiples en prueba de tensión.	100
Figura 41. Curva esfuerzo-deformación para probetas de aluminio reciclado modificado con 3.0% V de nanotubos de carbono de paredes múltiples en prueba de tensión.	101
Figura 42. Curvas esfuerzo-deformación de todos los ensayos a tracción ejecutados.	106
Figura 43. Ensayo a compresión para aluminio reciclado modificado con 1.5% V de nanotubos de carbono.	108

Figura 44. Ensaye a compresión para aluminio reciclado modificado con 3.0% V de nanotubos de carbono.	109
Figura 45. Análisis de esfuerzos en SAP2000 para un marco de aluminio reciclado con 1.5% nanotubos de carbono.	112
Figura 46. Marco de Al 514.0 reciclado modificado con 1.5% MWCNT. a)Elementos trabajando adecuadamente en amarillo y naranja según referencia de la derecha b)Carga viva aplicada de 200 Kg en cada articulación, c) Carga muerta de 500 Kg, d) Momento resistente 3-3, e) Esfuerzo cortante, f) Fuerza axial en elementos.	113
Figura 47. Análisis de esfuerzos en Sap2000 para una cercha de aluminio 6061 T6 bajo criterio de 1.5% de MWCNT.	117
Figura 48. Cercha de Al 6061-T6 reciclado modificado con 1.5% MWCNT. a) Elementos trabajando adecuadamente en celeste, verde, amarillo y naranja según referencia de la derecha b)Carga viva aplicada de 150 Kg en cada articulación, c) Carga muerta de 150 Kg, d)Carga muerta Distribuida de 100 kg sobre largueros, e) Momento resistente 3-3, f) Esfuerzo cortante, g)) Fuerza axial en elementos, h) Elementos extruidos distinguidos por colores.....	119

1 INTRODUCCIÓN

Cada vez es más difícil ignorar los cambios climáticos a los que nos vemos expuestos con mayor frecuencia y dinamismo. Se empiezan a notar ampliamente las incontables consecuencias del crecimiento en la industrialización por medio de cambios climáticos y deterioro y pérdidas de áreas verdes, bosques y selvas.

Si bien el clima siempre ha variado, en los últimos años, estos cambios han aumentado notoriamente y si no se toman medidas para prevenir su exponencial incremento, es sumamente probable que nos encontremos enfrentado graves problemas como recursos insuficientes, espacios limitados debido a daños o inhabitabilidad y falta alimentos para las generaciones futuras debido a las malas condiciones climáticas. Por ello y en la medida de lo posible, haciendo pequeños cambios se puede revertir y/o frenar este proceso.

El cambio climático sin duda está directamente relacionado con la emisión de gases de efecto invernadero producidos por el exceso de uso y quema de combustibles fósiles provocados por el desarrollo humano. Un elemento crucial en el desarrollo de toda urbe es aquél material que sirve como base para su construcción: el acero.

La industria de la construcción forma parte de las actividades secundarias generadoras del PIB Nominal con un 1.8% del 32.9% total en el último trimestre del 2014, y con una variación total del PIBN de 1.9% para actividades secundarias en el primer trimestre del 2016 contra el mismo del 2015 de acuerdo a estadísticas mostradas por el Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI), por lo que toda esta actividad no se realiza sin dejar una profunda huella ambiental (Secretaría de Energía, 2015).

Labandeira et al., (2007) afirman que existen una compleja interacción entre la economía y el medio ambiente, caracterizada por una sobreexplotación de los recursos para cubrir las necesidades humanas y no ha sido hasta recientemente que se comienza a dar real valora estos recursos. Por ello se debe reconocer que la aceleración a la que nuestra especie crece demanda un consumo de energía exuberante que además, se basa en la combustión masiva de fósiles no renovables imponiendo límites intransigentes al crecimiento económico.

Estos mismos autores hablan de un espiral población-pobreza-deterioro ambiental donde existen efectos locales, regionales y globales los cuales deben ser urgentemente prevenidos buscando soluciones ambientales.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo al INEGI, en el año 2012, en México se emitieron 435.8 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) de los cuales 133.3 se debieron a la generación de calor y electricidad, y 58.2 a la industria manufacturera y de la construcción.

Según la Secretaria de Energía (SENER) , en el año 2014 el consumo final total nacional de energía fue de 5,128.01 PJ. Al consumo energético total se le atribuyen 7,895.79 PJ de los cuales 68.89 PJ se debieron al coque de carbón, 868.52 a la generación de electricidad y 657.09 al gas seco de los cuales, en base a la información obtenida del Balance Nacional de Energía y a la Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero (CANACERO) en ese mismo año, la industria del hierro y del acero obtuvo los siguientes indicadores: consumo de coque de carbón de 33%, consumo de electricidad del 10% y consumo de gas seco del 56% del total nacional, siendo esta industria la de mayor consumo de energía (Hidalgo, Szabo, Ciscar, & Soria, 2005).

El crecimiento de un país no debe depender únicamente del sector económico, sino también de la capacidad de proteger sus recursos naturales y prevenir daños ambientales que pudieran perjudicar directamente a las generaciones futuras.

Además, el uso de tecnologías de punta que pudieran facilitar la capacidad de cuidado ambiental y que incluso proporcionen cualidades y capacidades mejoradas a los materiales que existen actualmente con el fin de disminuir la excesiva producción de materiales convencionales que explotan los recursos proporcionados por la naturaleza, generarán crecimiento social y expandirá los parámetros culturales (Goosen, 2012).

Sarkis et al. (2012) sostiene que la sustentabilidad intergeneracional toma en cuenta las necesidades de las futuras generaciones y el hecho de que éstas no se vean comprometidas con las actividades actuales, siendo incluso más apropiado este concepto en el sector de la construcción ya que las estructuras que se construyen, se planean de acuerdo a los requerimientos y exigencias del presente y en muy pocas ocasiones en las futuras.

Existe la preocupación en desarrollar un medio de construcción que minimice el impacto en el ambiente natural, por lo tanto, la necesidad de incorporar sensibilidad en el diseño y uso a conciencia de materiales verdes durante la construcción para prevenir degradación innecesaria (Zutshi y Creed, 2015).

La relación entre el manejo medio ambiental, el progreso económico y el bienestar individual es un proceso complicado, afectando tanto la calidad como la sustentabilidad de nuestras sociedades.

En el pasado, el ecosistema era capaz de absorber los daños ecológicos resultantes de la extensa industrialización y desarrollo social, sin embargo, con el rápido incremento de la población mundial así como de la demanda de explotación de recursos naturales (como yacimientos de agua, carbón, petróleo, gas natural y la tierra).

Como sociedad debemos buscar los conocimientos necesarios que lleven a la innovación y eficiencia de nuestros recursos naturales y energéticos que aseguren un futuro seguro con la capacidad de continuar albergando a la creciente humanidad latente.

Economizar recursos debe ser una prioridad en todos los sectores tanto económicos como sociales. Y este es el tiempo adecuado pues, de acuerdo a Jiménez Beltrán (2006) las esperanzas de futuro a nivel global están puestas en el paradigma del desarrollo sostenible.

En los últimos años, ha habido un interés creciente en desarrollar nuevos materiales para la industria de la construcción, aunque el acero ha sido, y sigue siendo el material predilecto para forjar estructuras pesadas, empieza a ser el momento de desarrollar materiales alternos que de forma integral, permitan mezclar los avances tecnológicos que permitan abrir una brecha importante en el manejo materiales con características mejorables que además se pueden rescatar de la chatarra.

Avances tecnológicos como la nanotecnología, en definiciones varían constantemente, pero siempre hará referencia a la comprensión y manipulación de materia a nano escala, es decir de 0.1 nm a 100 nm. Controlar materia a esta escala, significa que distintas leyes físicas (específicamente la física cuántica) serán estudiadas (Felipe & Rodríguez, 2012).

Gracias a la nanotecnología se han logrado desarrollar materiales compuestos cuya estructura interna se ha diseñado de tal manera que pueda ser manipulada, y/o controlada para responder según las necesidades a las que se vea expuesto.

Materiales tradicionales como metales y cerámicos muestran propiedades ampliamente mejorables y con nuevas funciones. Al obtener el control de las estructuras a nanoescala se pueden llegar a lograr materiales extraordinarios, como lo son los nanotubos de carbono con una resistencia a la tensión de hasta 100 veces la del acero (Zhu & Bartos, 2004).

1.2 JUSTIFICACIÓN

El uso principal de los materiales ha sido el de proporcionar a nuestro modo de vida una mayor comodidad a mayores densidades, viajando a mayores distancias. En los últimos 100 años ha habido un cambio veloz del campo a las urbes donde se puede dormir, trabajar y tener una vida afable simplemente porque se tienen los materiales para obtener calor, luz, frescura, seguridad y viajar rápida y cómodamente entre estas urbes. Tal es la atracción de las ciudades que para el año 2009, la mitad de la población mundial vivía en ellas (Labandeira et al., 2007). A nivel mundial se cuenta con 21 mega ciudades con más de 10 millones de personas albergando en cada una. Y es que aunque estas grandes ciudades aparenten ser eficientes pero con el continuo incremento de la economía entre las ciudades y las zonas rurales aledañas la demanda de materiales incrementa diariamente.

Transformando, elaborando y comprando materiales es un buen modo de usar nuestro dinero. Alrededor de un tercio de billón de personas en el mundo, 5% de todos nosotros, se encarga de transformar directamente los materiales para todos los demás y el 10% de nuestros gastos se dirigen a las compañías que los hacen.

Eventualmente, el planeta se quedará sin minerales y combustibles fósiles, pero para que eso suceda falta mucho camino por recorrer. El desafío más grande relacionado con la escasez de recursos es que la humanidad se está terminando los mejores depósitos, de manera que en un futuro se tendrá que invertir mucho más dinero y energía para explotar los sitios menos convenientes. Esto desembocará precios altísimos y puede crear conflictos debido a la distribución geográfica de los recursos.

Para obtener una tonelada de minerales, se deben extraer diez toneladas de roca de donde se extrae el elemento de interés. Esta extracción requiere energía, pero también el uso de químicos que muchas veces son dañinos. La mayoría son regulados y controlados, pero no se conocen las consecuencias a largo plazo de liberar este tipo de sustancias, por lo que es

difícil saber si son seguros o no. Las emisiones de estos químicos al suelo, agua y aire pueden derivar en múltiples daños en distintas especies.

Este proyecto resalta la importancia de desarrollar sistemas constructivos alternos y proporcionar a la sociedad soluciones preventivas para mejorar las condiciones ambientales y por ende sociales a través de un material cuya producción dejará una huella ambiental mucho menor a la que genera la producción de acero y cuyas propiedades puedan ser equivalentes. De igual manera, se tiene la oportunidad de contribuir al conocimiento del uso de nanotecnología para mejorar las características y cualidades de los materiales existentes y de aquellos que pueden ser reciclados para reducir la degradación ambiental por parte de la exigencia industrial.

Se considera esta investigación multidisciplinaria al integrar áreas como nanotecnología, materiales y estructuras para la propuesta de nuevos procesos constructivos dentro del área de la Ingeniería Civil y para la solución de problemas ambientales regionales, nacionales y globales a los que la sociedad se ve sujeta y dejar a las generaciones futuras otras opciones constructivas que no deterioren más los recursos naturales, y que puedan usarse con los desechos cotidianos mejorados con tecnología de punta. Este estudio contribuye a una visión alternativa al tradicional uso del acero como único metal utilizable estructuralmente en el sector de la construcción, y abrir una brecha al desarrollo futuro de nuevos materiales integrales amigables con el medio ambiente e innovadores.

Se busca obtener las cifras correspondientes a las propiedades del compuesto aluminio reciclado/nanotubos de carbono para poder introducirlos en un modelo virtual de una malla espacial de 36 m^2 y poder conocer su comportamiento ante distintos modos de carga. De esta manera sabremos si este material es apto para considerarse una opción tangible dentro de los materiales elegibles estructuralmente.

Si bien existe gran cantidad de investigaciones sobre lo distintos tipos de mezclado de nanotubos de carbono en una matriz de aluminio, siempre se ha visto un enfoque dirigido a la industria automotriz, aeroespacial o electrónica. Además de que el aluminio que se utiliza es puro tipo 2024Al (Deng et al. 2006), MM Al-3 (Asgharzadeh et al. 2014), AS 011 (Brandburry et al., 2013) por mencionar solo algunos, y en este trabajo se realizará el compuesto utilizando aluminio 100% reciclado.

La literatura científica desarrollada hasta el momento no muestra una amplia evidencia acerca de estudios donde composites Al-NTC hayan sido empleadas estructuralmente, por lo que este estudio está innovando en el área de investigación de materiales, basándose en estudios donde se ha obtenido éxito al mejorar las propiedades del aluminio al ser reforzado con nanotubos de carbono para ser usado en otros sectores industriales como automotriz o aeroespacial, asimismo es un trabajo multidisciplinario entre las áreas de Ingeniería Civil, Ingeniería en Nanotecnología e Ingeniería en Materiales.

1.3 HIPÓTESIS

Es posible crear un material de aluminio reciclado de latas de bebidas que mediante la incorporación de nanotubos de carbono de paredes múltiples en bajos porcentajes de volumen, su módulo de elasticidad, dureza, resistencia a la tensión y compresión incrementen de tal manera que pueda ser empleado estructuralmente.

1.4 OBJETIVOS

A continuación, se presentan los objetivos generales y particulares:

1.4.1 **Objetivo General:**

Desarrollar las bases para crear un material compuesto con aluminio reciclado de latas y reforzado con nanotubos de carbono para usarse estructuralmente, que pueda proporcionar a la sociedad una alternativa ambientalmente amigable y de alta tecnología para usarse en la construcción de estructuras metálicas.

1.4.2 **Particulares:**

- a) Obtener aluminio a partir de la fundición de latas usadas.
- b) Generar el composito aluminio-nanotubos de carbono a diferentes proporciones %V 0.0075%, 1.5%, 3.0% del elemento reforzante (nanotubos de carbono).
- c) Caracterizar físico-químicamente el composito aluminio-nanotubos de carbono a través de pruebas de microscopio óptico, SEM, EDS y XRD para conocer las condiciones de los nanotubos de carbono dentro de la matriz de aluminio.
- d) Someter las barras obtenidas a pruebas mecánicas: tensión, compresión, y dureza para obtener las variables necesarias en la simulación virtual (módulo de Poisson, módulo de Young, límite de fluencia, límite elástico).
- e) Evaluar el comportamiento mecánico a partir de los datos analíticos y experimentales obtenidos a través de una malla espacial modelada en SAP para conocer sus deformaciones y bajo diferentes tipos de carga.

2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Antecedentes

De acuerdo a varios grupos de investigación y a lo largo de los años, se muestran avances significativos en el entendimiento de los composites NTC-Aluminio, dando pauta a su potencial aplicación dentro del área de la construcción.

Noguchi et al. (2004) fabricaron compuestos de aluminio-nanotubos de carbono empleando pulvimetalurgia y encontraron que la resistencia a la tensión del compuesto fue mayor al del aluminio puro, atribuido a la gran resistencia a la tensión que muestran los nanotubos de carbono.

Dentro de otro grupo de investigación, George et al. (2005) encontraron que este compuesto con NTC al 0.5% y 2% de volumen obtenía un módulo de Young superior al del aluminio puro del 12% y 23% respectivamente.

Anteriores estudios emplearon diversos métodos para mezclar los nanotubos en la matriz de aluminio aplicándolos como un recubrimiento sobre la superficie de aluminio (Liao & Tan, 2010), síntesis *in situ* de los NTC en polvos de aluminio (He et al., 2010), mezclado a nivel molecular de NTC con cobre y polvos de aluminio y molienda mecánica (Nam et al., 2012).

Liao & Tan (2010) emplearon pulvimetalurgia añadiendo cantidades de 0.5% en peso de NTC, obteniendo mejoras evidentes en dureza y resistencia a la tensión en el material compuesto obtenido.

Li, Rottmair & Singer (2010) aseguran que a pesar de los distintos métodos que se han usado para crear este compuesto, como extrusión en caliente, formación de plasma en

aerosol y prensado en caliente, generalmente la optimización de las propiedades alcanzadas en el compuesto NTC-Al no alcanza las expectativas debido a que éstos no se dispersan homogéneamente o se aglomeran en las fronteras de los granos de la matriz del metal, pero una tecnología capaz de dispersar los NTC adecuadamente en el metal es a través de la fundición.

Esawi & El Borady (2006) entre muchos otros investigadores afirman resultados satisfactorios agregando 0.5% en porcentaje de peso de NTC a sus matrices de Al, sin embargo, otros autores como Deng et al. (2007), los han obtenido con porcentajes de 1.0% también en peso.

Este material compuesto de aluminio reforzado con nanotubos de carbono, por su anticipada ligereza, alta resistencia, y gran conductividad promete ser un material para uso estructural en componentes de la industria automotriz, aeroespacial y eléctrica (Chen et al., 2015).

2.2 Marco teórico

2.2.1 Materiales compuestos

Mott (2009) define a los materiales compuestos como una división de dos partes que combinados crean una unión mecánica o adhesiva, donde una de ellas es una matriz típicamente de baja densidad y la otra un reforzante de relleno que proporciona fuerza y rigidez. La matriz, además, almacena al relleno reforzante en una orientación favorable al estado de carga de manera que éstas sean distribuidas al relleno reforzante que gran parte de su capacidad de carga será soportado por él, obteniendo como resultado, un material compuesto que además de tener alta resistencia y rigidez tiene bajo peso en comparación a su capacidad de carga.

De acuerdo a Askeland (2005), los materiales reforzados con fibras, tienen una mayor resistencia a la fatiga y rigidez, así como una relación peso-resistencia mejorada cuando se incorporan fibras de características rígidas y resistentes a una matriz blanda y dúctil debido a que ésta última le transfiere la fuerza a las primeras, soportando la mayor cantidad de la fuerza que se le aplique incluso a temperaturas elevadas.

En un compuesto de matriz metálica, la función principal de ésta, es transmitir y repartir las cargas a los elementos reforzantes por medio de una deformación plástica con tensiones menores a las que el compuesto pueda someterse y sin llegar a la ruptura, con un módulo de elasticidad relativamente moderado (Hosford, 2005).

Dentro de las funciones del elemento reforzante dentro de una matriz metálica se pueden mencionar el soporte de tensiones ejercidas sobre el compuesto, incremento de sus propiedades mecánicas como dureza y resistencia al desgaste, así como mitigar las fallas consecuentes por este tipo de características al aumentar la temperatura y ralentizar la propagación de grietas y desarrollo de fisuras.

Algunas ventajas y limitaciones sobre los materiales compuestos que Robert L. Mott describe en ‘Resistencia de Materiales Aplicada’ son:

“

1. Las resistencias específicas de los materiales compuestos pueden variar hasta en cinco veces respecto a las aleaciones de acero de alta resistencia.
2. Los módulos específicos de los materiales compuestos pueden ser hasta de ocho veces las aleaciones de acero, de aluminio o titanio.
3. Los materiales compuestos típicamente funcionan mejor que el acero o el aluminio cuando existen cargas cíclicas que producen el potencial de fractura por fatiga.

4. Donde se esperan cargas de impacto y vibraciones, estos materiales pueden formularse de manera especial con otros que proporcionen alta resistencia y amortiguación.
 5. Algunos compuestos tienen mayor resistencia al desgaste que los metales y/o aleaciones.
 6. Una cuidadosa proporción de la matriz y del material de relleno pueden proporcionar una resistencia superior a la corrosión.
 7. Los cambios provocados por la temperatura son mejores en los materiales compuestos que en los metales.
 8. Se pueden planificar la colocación de fibras de refuerzo en las direcciones que proporcionen la rigidez y resistencia requeridas en las condiciones específicas de cargas esperadas.
 9. Pueden hacerse estructuras de formas complejas de una sola pieza. La eliminación de juntas, en general, mejora la confiabilidad de estas estructuras.
 10. Como las estructuras compuestas salen directamente en su forma final o casi final, se reduce la cantidad de operaciones secundarias requeridas,
- »

Limitaciones:

“

1. Los costos son en mayores que los de muchos materiales alternativos.
2. La técnica de fabricación, al ser muy distinta, se deberá considerar equipo nuevo de fabricación, junto con capacitación adicional para los operarios de producción.
3. Su comportamiento debido a las técnicas de producción, está sujeto a un mayor rango de variabilidad que para la mayoría de las técnicas de fabricación de metales.

4. Sus propiedades no son isotrópicas. Esto significa que las propiedades varían dramáticamente con la dirección de las cargas aplicadas.
5. Existe una falta general de comprensión del comportamiento de los materiales compuestos y los detalles de la predicción de modos de fractura.
6. El análisis de estructuras compuestas requiere un detallado conocimiento de más propiedades mecánicas de materiales de lo que se requeriría para otros materiales.
7. La inspección y las pruebas de las estructuras compuestas son más complicadas y menos precisas que las de estructuras metálicas ya que la reparación y mantenimiento de las estructuras compuestas son una grave preocupación”

2.2.2 Interfase matriz-reforzante

La unión entre el elemento de refuerzo y la matriz donde se encuentra embebido, condiciona ampliamente la transmisión y repartición de toda carga aplicada al compuesto y a sus propiedades mecánicas por añadidura.

Es decir, que si esta unión no es eficiente, la matriz no podrá ser capaz de soportar las tensiones a las que sea sometida por lo que los refuerzos no tendrían utilidad alguna. Es por eso que la interfase es una parte fundamental que determina la unión adecuada o no del refuerzo y la matriz asegurando una transferencia de cargas ideal en el compuesto.

Para que exista una interfase adecuada se deben cumplir ciertos parámetros donde la unión debe ser lo suficientemente fuerte para que los esfuerzos sean transmitidos de la matriz al refuerzo, siendo también estables en el tiempo y temperatura a la que se cree el compuesto.

Los coeficientes de dilatación térmica no deben diferenciarse demasiado para no limitar los efectos producidos por las tensiones internas que pudieran suceder en la interfase al someterse a temperaturas altas (Rösler, Harders y Bäker, 2007).

2.2.2.1 Propiedades elásticas en compuestos reforzados con fibras

Hosford (2005) describe que el arreglo más simple es aquel donde las fibras son ordenadas paralelamente. La deformación paralela a las fibras es la misma tanto en la matriz como en las fibras:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon \quad (1)$$

Cuando la carga es paralela al acomodo de las fibras, la carga total F es la suma de las fuerzas en las fibras F_f y en la matriz F_m . En términos de esfuerzos:

$$F_f = \sigma_f A_f \text{ y } F_m = \sigma_m A_m \quad (2)$$

donde σ_f y σ_m son los esfuerzos en las fibras y en la matriz y donde A_f y A_m son el área de la sección transversal de la fibra y la matriz respectivamente. La fuerza total F es la suma de F_f y F_m :

$$\sigma_A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (3)$$

Donde A es el área total, es decir:

$$A = A_f + A_m \quad (4)$$

y σ es el esfuerzo F/A . Para cargas elásticas:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5)$$

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \quad (6)$$

y

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m \quad (7)$$

de modo que

$$E\varepsilon A = E_f \varepsilon_f A_f + E_m \varepsilon_m A_m \quad (8)$$

Si

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon \text{ y } \frac{A_f}{A} = V_f \quad (9)$$

y

$$\frac{A_m}{A} = V_m \quad (10)$$

entonces:

$$E = E_f V_f + E_m V_m \quad (11)$$

Esta es la llamada Regla de mezclas. Si se considera un comportamiento del mismo compuesto, pero bajo tensión perpendicular a las fibras, deja de ser lógico asumir que:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon \quad (12)$$

por lo que se asume que los esfuerzos en la matriz y las fibras son los mismos:

$$\sigma_f = \sigma_m = \sigma \quad (13)$$

En este caso:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (14)$$

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (15)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} \quad (16)$$

y la deformación total es:

$$\varepsilon = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m V_m \quad (17)$$

Combinando estas ecuaciones, se tiene que:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{V_f \sigma_f}{E_f} + V_m \sigma_m E_m \quad (18)$$

Finalmente, si:

$$\sigma_f = \sigma_m = \sigma \quad (19)$$

Se obtiene:

$$\frac{1}{E} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (20)$$

El comportamiento del compuesto bajo cargas perpendiculares a las fibras se encuentra entre las ecuaciones 11 y 20.

Así mismo, Rösler, Harders y Bäker (2007) reportan que si las fibras reforzantes se comportan de forma continua y unidireccional dentro de la matriz envolvente, se pueden

predecir algunas de sus propiedades como el módulo de elasticidad, densidad, conductividad eléctrica y térmica a lo largo de la dirección de las fibras, entre otras, por medio de la misma “Regla de mezclas”:

$$\rho_c = f_m \rho_m + f_f \rho_f \quad (21)$$

$$k_c = f_m k_m + f_f k_f \quad (22)$$

$$\sigma_c = f_m \sigma_m + f_f \sigma_f \quad (23)$$

Los subíndices m y f se refieren a la matriz y a la fibra:

$$f_m = 1 - f_f \quad (24)$$

donde ρ es la densidad, K es la conductividad térmica y σ es la conductividad eléctrica. f es la fracción volumétrica de los constituyentes dentro del compuesto:

$$E_c = f_m E_m + f_f E_f \quad (25)$$

Aun así, debido a que normalmente las matrices son poco rígidas, cuando el esfuerzo que se aplica al compuesto es demasiado alto, comienzan a deformarse de manera que la curva esfuerzo-deformación deja de ser lineal, por lo que el módulo de elasticidad se deberá predecir con:

$$E_c = f_f E_f \quad (26)$$

Ahora, si la carga aplicada se realiza perpendicular a la dirección de las fibras, los componentes del compuesto reaccionarán de manera independiente, siendo:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{f_m}{E_m} + \frac{f_f}{E_f} \quad (27)$$

De cualquier modo, cuando las fibras reforzantes no se comportan continuamente ni de manera unidireccional, esta regla no puede ser aplicada.

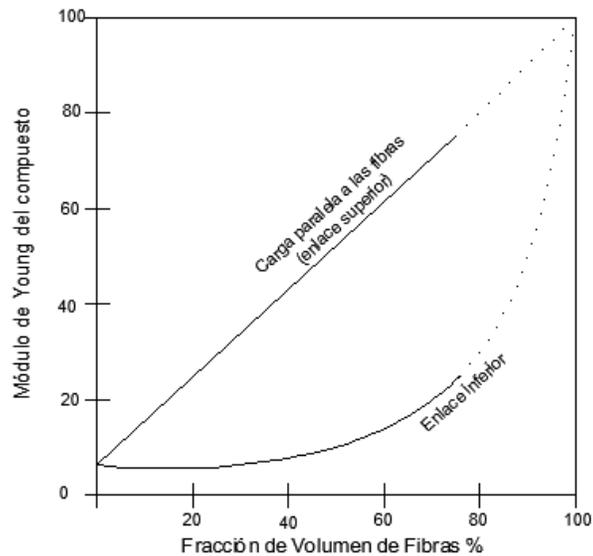


Figura 1. Límites superior e inferior del módulo de Young en compuestos reforzados con fibras (Rösler, Harders y Bäker 2007).

En la Figura 1 se puede observar que el límite superior es apropiado para cargas paralelas a la posición de las fibras por lo que la carga perpendicular a ellas se encuentra en medio de ambos límites. Las líneas punteadas muestran proporciones de fibra mayores al 60% en volumen.

Diversos arreglos geométricos son posibles en las fibras: unidireccionales, a 90° unos de otros o cruzados u orientados aleatoriamente.

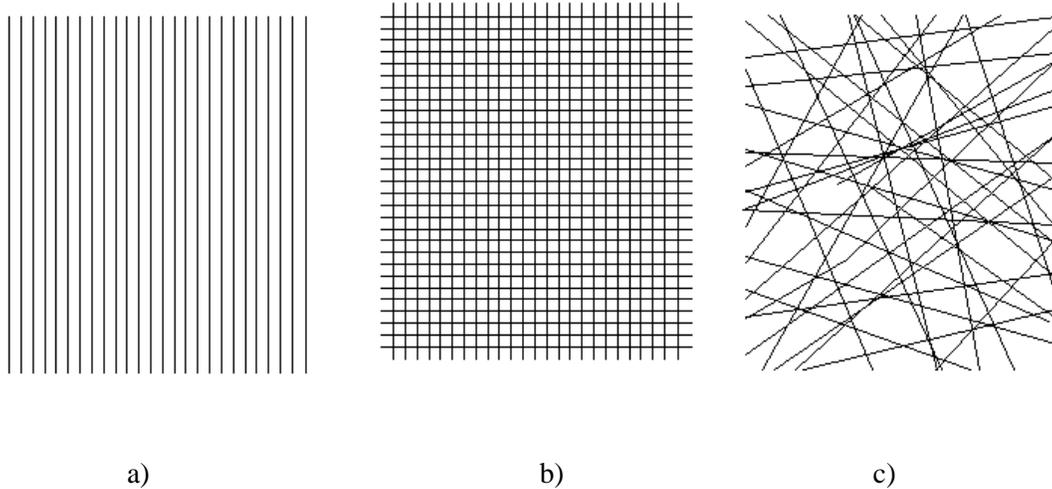


Figura 2. Distintos tipos de arreglos en refuerzos con fibras (Hosford, 2007) a) arreglo unidireccional, b) arreglo cuadrículado a 90° , c) arreglo aleatorio o cruzado .

El módulo de Young de un compuesto reforzado con una fibra, es determinado por las propiedades elásticas de los materiales que lo constituyen y de la dirección de la carga aplicada. Debido a que las fibras son más rígidas que la matriz donde se embeben, el módulo es mayor en la misma dirección de las fibras que transversal a estas.

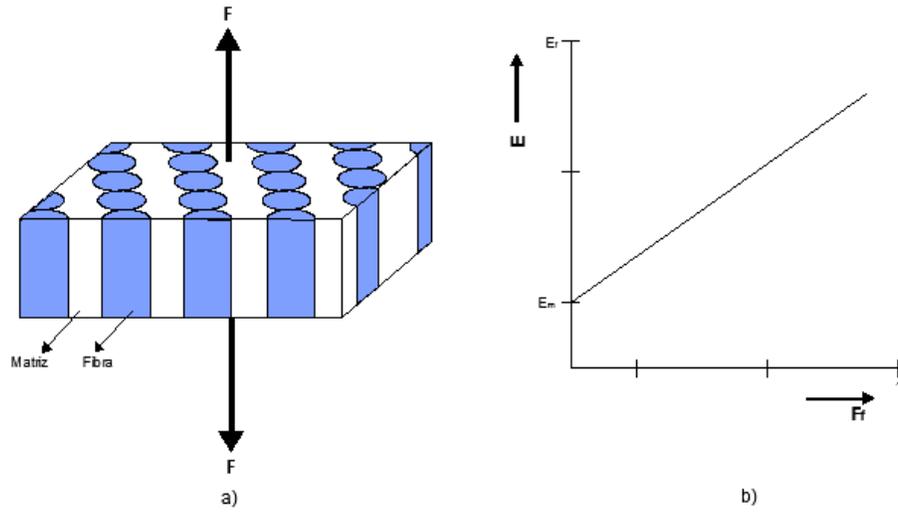


Figura 3.a) Carga paralela al arreglo de fibras dentro de la matriz. b) Dependencia del módulo de Young con la fracción de volumen de la fibra.

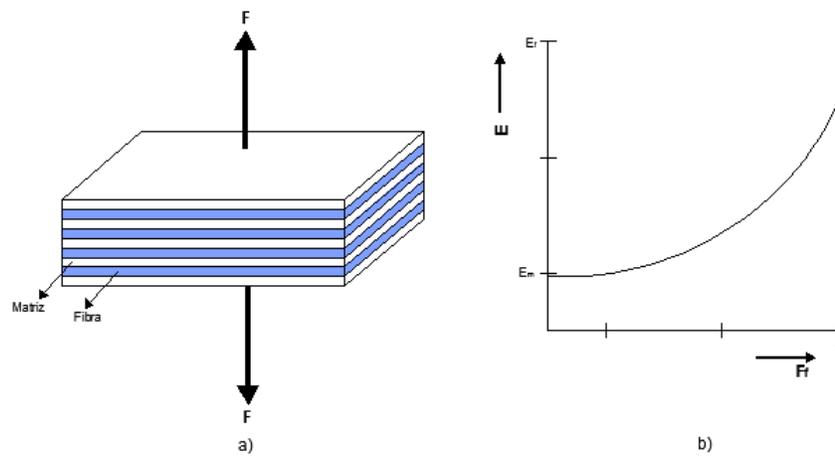


Figura 4. a) Carga perpendicular al arreglo de fibras dentro de la matriz. b) Dependencia del módulo de Young con la fracción de volumen de la fibra.

2.2.2.2 Anisotropía

La falla comienza cuando los esfuerzos en la matriz o en la fibra comienzan a fluir. Igual que en un caso elástico, se puede aplicar una regla de mezclas de esfuerzos uniformes para calcular el esfuerzo dentro del compuesto.

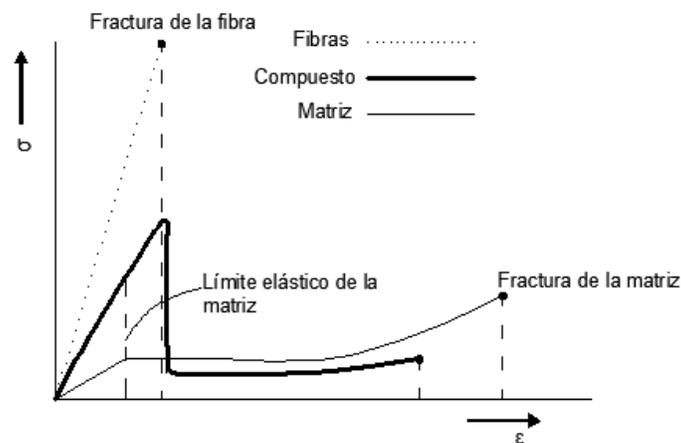


Figura 5. Diagrama de curva esfuerzo-deformación de un polímero reforzado con fibras.

$$\sigma = \sigma_f f_f + \sigma_m (1 - f_f) \quad (28)$$

Donde σ_f y σ_m son los esfuerzos en la fibra y la matriz respectivamente y f_f es la fracción de volumen de la fibra. Esta regla de mezclas es solo una aproximación.

Si un compuesto reforzado con fibras es sometido a tensión, la deformación dentro del material es no homogénea debido a que la fibra con un módulo de elasticidad 100 veces

mayor al de la matriz en la que se encuentra rodeada, resiste las deformaciones con mayor fuerza que la matriz, la deformación en esta incrementa proporcionalmente.

Para Rösler, Harders y Bäker (2007) esto tiene como consecuencia, en primer lugar, que la deformación en la matriz a la derecha e izquierda de la fibra es mayor que en cualquier lado un poco más alejado de esta, obteniendo una deformación más concentrada en la región de la fibra que en todo el material en promedio.

Y en segundo lugar, el esfuerzo cortante ocurre cerca de los finales de la fibra en la interfase fibra-matriz incrementando la deformación en esa zona. La deformación en la matriz de un compuesto es entonces, mayor que la deformación en la fibra y también es mayor que la deformación en un material homogéneo con una deformación total igual.

En una matriz metálica el esfuerzo cortante máximo interfacial es usualmente determinado por el límite de elasticidad de la matriz que es menor que la fuerza adhesiva en la mayoría de los casos.

2.3 Aluminio en la construcción

Previa a la descripción de los usos del Aluminio (Al) dentro del área de la construcción, vale la pena mencionar las principales ventajas de dicho elemento:

Entre sus principales características se encuentra la ligereza y resistencia a la carga, la alta resistencia a la corrosión, una muy buena conductividad, excelentes cualidades reflectantes, fácil producción y procesamiento, es impermeable, no es tóxico, es inodoro, inflamable, de recursos abundantes del mineral, y además muy fácil de reciclar.

Ahora bien, un mito es, que el Al no es suficientemente resistente para servir como metal estructural. El hecho es, que su aleación más común (6061-T6) tiene una resistencia al esfuerzo de 35 ksi (250 Mpa) lo cual es muy parecido al acero A36.

Esta resistencia, sumado a su ligero peso (casi un tercio del acero), hace del Al particularmente ventajoso para uso estructural donde el peso muerto es de gran importancia. Su alta relación resistencia-peso ha favorecido el uso en diversas aplicaciones como rehabilitaciones de puentes, losas de largos claros, etc. En cada caso, la carga muerta reducida, comparado con un material convencional, permite una mayor vida útil (Ferry, 2002).

El acero es, por tradición, usado en fachadas y techumbres desde los años 20's e incluso antes en Londres, donde una cadena reforzada fue instalada para estabilizar el domo de la catedral St. Paul (Baddoo, 2008).

Un siglo ha pasado, donde el acero debido a sus características tan explotables en la industria de la construcción presenta a los profesionales una amplia gama de formas y colores siendo además adaptable, inoxidable e incluso reciclable.

El uso del Al ha ido aumentando en cuanto a diseño, con aplicaciones como muros cortina, fachadas, techumbre, rejilla de sombreado y en diseño de interiores. Un buen ejemplo de su uso se puede observar en el nuevo estadio de la NFL que fue construido y equipado con grandes cantidades de aleación especial de Al para distintas necesidades (Das et al., 2010).

Tabla 1. Uso de aluminio en el mundo.

Porcentaje de producción mundial	Aplicación	Millones de toneladas
4%	Equipo electrónico	2
9%	Cables eléctricos	4
7%	Equipo mecánico (como calentadores y ventiladores)	3
13%	Envasados (la mitad se usa en latas de aluminio para bebidas de 14 gr cada una)	6
24%	Construcción (en su mayoría en cancelería o en techumbres y recubrimientos anticorrosivos)	11
7%	Electrodomésticos	3
9%	Otros (pinturas y pigmentos)	4

Por masa, se producen 25 veces más acero que aluminio cada año, por volumen debido a que éste es tres veces menos denso que el acero, se producen ocho veces más acero, sin embargo, los productos de aluminio son alrededor de cinco veces.

Actualmente, uno de los logros más significativos en el campo de las aleaciones base Al ha empezado a ser empleadas en fachadas, sistemas de techo, puentes móviles y en estructuras situadas en ambientes húmedos. Las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas de este tipo de material aleado, son propias de un material no lineal con un importante endurecimiento y ductilidad (Buchanan, Gardner, & Liew, 2016) .

A pesar de que las aleaciones de aluminio poseen propiedades de resistencia a la tensión relativamente menores a las del acero, su resistencia específica (relación resistencia-peso propio) es mayor (Askeland, 2005) .

El peso es un factor de suma importancia en gran cantidad de aplicaciones. Es por ello que, para relacionar la resistencia del material con su peso propio, existe una propiedad llamada “resistencia mecánica específica” o “relación resistencia-peso”:

$$\text{Resistencia mecánica específica} = \text{Resistencia mecánica} / \text{densidad} \quad (29)$$

Tabla 2. Resistencia específica y costo de aleaciones no ferrosas (Askeland,2005)

Metal	Densidad (kg/cm ³)	Resistencia a la tensión (kg/cm ²)	Resistencia específica (cm)	Costo en pesos por kg
Aluminio	0.0027	5833	2.16E+06	36.44
Berilio	0.00185	3865	2.09E+06	-
Cobre	0.00893	10544	1.18E+06	113.57
Plomo	0.01136	703	6.19E+04	43.65
Magnesio	0.00174	3865	2.22E+06	99.16
Níquel	0.0089	12655	1.42E+06	197.05
Titanio	0.00451	11248	2.49E+06	-
Tungsteno	0.01925	10544	5.48E+05	-
Zinc	0.00713	5272	7.39E+05	55.09
Hierro	0.00787	14062	1.79E+06	0.018

El aluminio es naturalmente resistente a la corrosión; el acero al carbón, por otro lado, tiene una tendencia a autodestruirse con el paso del tiempo debido a la continua conversión del metal de base a óxido de hierro comúnmente conocido como oxidación.

El acero inoxidable, del inglés "*Stainless steel*", donde '*stain*' se refiere a mancha de óxido, es una palabra que según (Bulson, 1996) debió ser inventada en un departamento de *marketing* dado que el término confiere a la cualidad de tener todos los atributos positivos del acero y ninguna desventaja.

Señala que, si se le aplica esta misma estrategia de *marketing* al aluminio, se le podría llamar "*light stainless steel*" es decir, acero inoxidable ligero, ya que después de todo, previene las manchas de oxidación tal como lo hace el acero inoxidable y pesa una tercera parte.

Desde hace más de siglo y medio, los ingenieros estructurales han dependido de metales para impartir capacidad de tensión de carga en componentes estructurales. Desde entonces se ha buscado mejorar las propiedades de los metales disponibles para la construcción. Una de las tareas de los diseñadores es elegir que metal es el indicado para una aplicación determinada (Bulson, 1996).

El aluminio es normalmente usado sin ningún acabado ni recubrimiento o pintura. El costo de una pintura inicial puede provocar que el acero sea más costoso que el aluminio, dependiendo de la calidad del acabado que se especifique. Los recubrimientos requieren, además, constante mantenimiento y reemplazo periódicamente. En adición al costo directo del acabado, incrementando el deterioro ambiental y la seguridad de los trabajadores que lo aplican. Estos costos extras de mantenimiento proporcionan una ventaja en el costo de vida útil.

El desempeño estructural es un factor mayor en la selección de un material estructural. A continuación, se presenta una tabla con las propiedades que afectan el comportamiento de cierto tipo de miembros estructurales:

Tabla 3. Propiedades que afectan el desempeño estructural de los metales.

Desempeño estructural de:	Propiedades
Miembros a tensión	Límite elástico, resistencia última, susceptibilidad al corte
Columnas (miembros a compresión)	Límite elástico, módulo de elasticidad
Vigas (miembros a flexión)	Límite elástico, resistencia última, módulo de elasticidad
Elementos de fijación	Resistencia última
Conexiones soldadas	Resistencia última de la aleación de relleno, resistencia última del metal base afectado por el calor

Factores adicionales como la facilidad de fabricación (extrusión y soldabilidad), rigidez (módulo de elasticidad), ductilidad (elongación), peso (densidad), resistencia a la fatiga y costos son comparados en tres tipos comunes de aluminio, acero al carbón y acero inoxidable (Bulson, 1996) en la Tabla 3.

Tabla 4. Comparación de tres metales comunes de uso estructural

Propiedad	Aluminio 6061-T6	Acero al carbón A36	Acero inoxidable 304 acabado frío
Capacidad de extrusión	Muy bueno	No práctico	Muy limitado
Soldabilidad	Baja, reduce su resistencia	Bueno, no se reduce su resistencia	Bueno
Resistencia a la corrosión	Buena	Baja	Muy buena
Resistencia a la tensión	240 MPa	240 a 340 MPa	310 Mpa
Módulo de elasticidad	69 GPa	199 GPa	186 GPa
Elongación	8% a 10%	20%	30%

Densidad	2.7 g/cc	7.8 g/cc	7.9 g/cc
Resistencia a la fatiga (metal llano, 5 millones de ciclos)	70 MPa	160 MPa	
Relación relativa resistencia a tensión- peso	2.8	1.0 a 1.4	1.2
Costo por peso (\$/kg)	19.00	4.20	14.00
Costo índice*	4.52	1.0	3.33

2.4 Aluminio y su reciclaje

La empresa Noruega *Hydro* en una publicación lanzada en el año 2012, asegura que la energía necesaria para construir un edificio a base de aluminio (energía integrada) es mayor que para la mayoría de los materiales.

Sin embargo, esta energía en un edificio es menor comparada con la consumida durante su vida útil y menor aún comparada con la energía potencial guardada, por ejemplo, usando aluminio externo como persianas se reduciría la necesidad de enfriar el edificio, con las condiciones climáticas promedio en ese país, el CO₂ evitado durante su uso, excederá el CO₂ emitido durante la producción en menos de un año, aun cuando el aluminio empleado no fuera reciclado si no primario. Después de la vida útil del edificio, el aluminio podrá ser reutilizado y reciclado.

El aluminio, es pues, un material que en contraste con muchos otros usados en la construcción que después de su demolición son tirados en vertederos o relleno, puede ser reciclado cuantas veces sean necesarias económica y sustentablemente.

Para hacer una tonelada de aluminio líquido a partir del mineral (óxido de alúmina Al_2O_3) se necesita más de 20 veces la energía requerida para hacer la misma cantidad a partir de chatarra (168 GJ/T vs. 7 GJ/T) (Allwood, Kong, & Pole, 2012).

Con estos datos, se podría sugerir entonces, que fabricar una lata de aluminio reciclado necesita solo el 4% de la energía para hacerla de aluminio primario. Sin embargo, es importante señalar que, para poder derretir el aluminio reciclado, primero se debe someter a un proceso de deslacado para remover pinturas y otros materiales (si no se cuenta con un proceso de recuperación de escoria), lo cual necesita la misma cantidad de energía que el proceso de fusión mismo, por lo que se dice que la energía es ahora el 8% de la primaria.

Por otro lado, Das et al. (2010) informan que la producción de aluminio primario, cuando toda la electricidad generada como pérdidas de transmisión y el combustible consumido en la transportación se ha tomado en cuenta, se requieren cerca de 45 kWh de energía y se emiten alrededor de 12 kg de CO_2 por cada kilogramo del metal. En contraste a esto, el reciclaje de aluminio requiere únicamente cerca de 2.8 kWh y emite unos 0.6 kg de CO_2 por kilogramo de metal.

Basta con decir que la energía gastada en el metal durante su primera fundición, es recuperada con un mínimo de pérdidas una vez que es reciclado.

Si se le suma la energía que se requiere para ‘endulzar’ el aluminio reciclado con el primario que es del 5% más la necesaria para manufacturar, estampar, y crear totalmente la lata entonces se obtendría un total de 26% de la energía principal, no 4%. Lo cual sigue siendo un ahorro notable (Allwood & Cullen, 2012).

Una de las propiedades más significativas del aluminio es su habilidad para poder ser reciclado repetidamente sin perder su integridad y una mínima cantidad de material a través de la oxidación (de 1% a 2%).

Aún más, reciclándolo se produce un ahorro del hasta 95% de energía y de emisiones comparado con su elaboración desde el mineral primario. Esta ventaja, se observa diariamente cuando las latas de bebidas son vendidas, consumidas, recicladas y en aproximadamente 60 días vuelven a estar disponibles en los centros de venta. Se prevé que esta cualidad será de alto impacto para la huella de carbono que produce la industria aluminera (Das, Green, & Kaufman, 2010).

Por estas razones es que el aluminio por si solo llama mucho la atención; ya se ha mencionado su muy baja densidad (2.7 g/cm^3), alta conductividad eléctrica, excelente ductilidad y buena maquinabilidad (Nie et al., 2011). Además, posee una excelente relación peso propio-capacidad de carga y propiedades anticorrosivas.

La edificación es uno de los grupos que a nivel mundial consumen la mayor cantidad de energía relacionada a la calefacción, enfriamiento, ventilación y electricidad, entre otros. Los edificios consumen cerca del 40% de la energía mundial. Creando más edificios energéticamente eficientes es fundamental para cambiar el cambio climático y el extremo uso de los recursos naturales (Hydro, 2012).

Desde un punto de vista sustentable, su reciclaje se empieza a ver como una “mina urbana” de material que permite su reúso mientras se ahorra energía y se reduce el impacto ambiental. Implementar nuevas aplicaciones de este metal ayudará a que la industria del reciclaje continúe creciendo (Das et al., 2010).

Esta combinación de propiedades únicas se vuelven importantes cuando se busca crear aleaciones con carbono y en especial con nanotubos de carbono (NTC) que se consideran un excelente reforzante pues le proporcionan al metal mejoras substanciales en sus propiedades mecánicas, físicas y químicas (H. Li et al., 2013) .

2.4.1 Fatiga en el aluminio

La fatiga tiene lugar cuando se aplica repetidamente un esfuerzo. Estos esfuerzos pueden variar, pero siempre serán de tensión, ya que la fatiga nunca inicia en presencia de esfuerzos compresivos.

Las grietas causadas por la fatiga ocurren con un esfuerzo menor que el requerido para llegar al quiebre del elemento. Mientras se aplique el esfuerzo con mayor repetitividad, menor será el esfuerzo necesario para provocar la falla.

La relación existente entre el número de ciclos de esfuerzos y la resistencia a la fatiga se muestra en la siguiente gráfica (Figura 6) llamada curva de esfuerzo-número de ciclos.

Cuando el número de ciclos (Figura 7) con amplitud constante está entre 10^5 y 5×10^6 , la relación se vuelve exponencial, de modo que se representa con una línea recta cuando las escalas son logarítmicas.

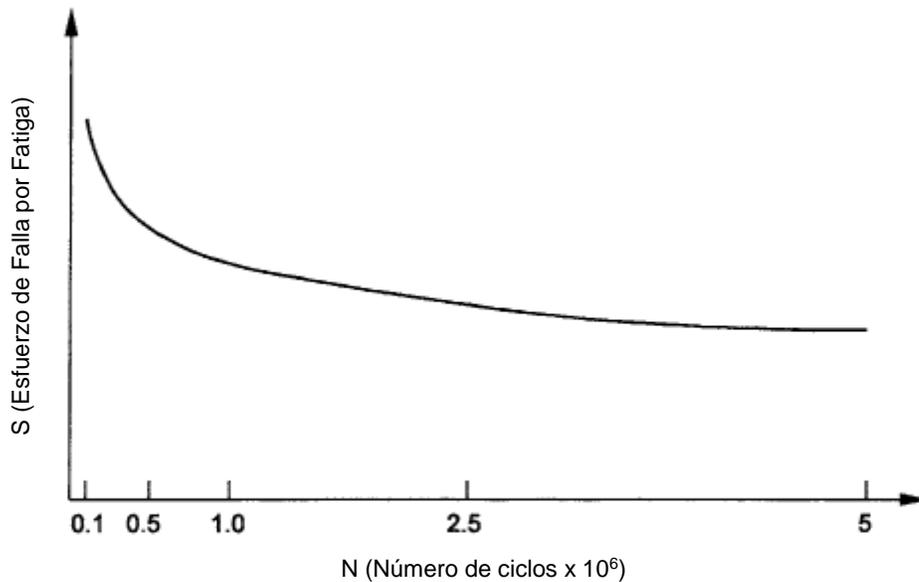


Figura 6. Curva S-N para fatiga.

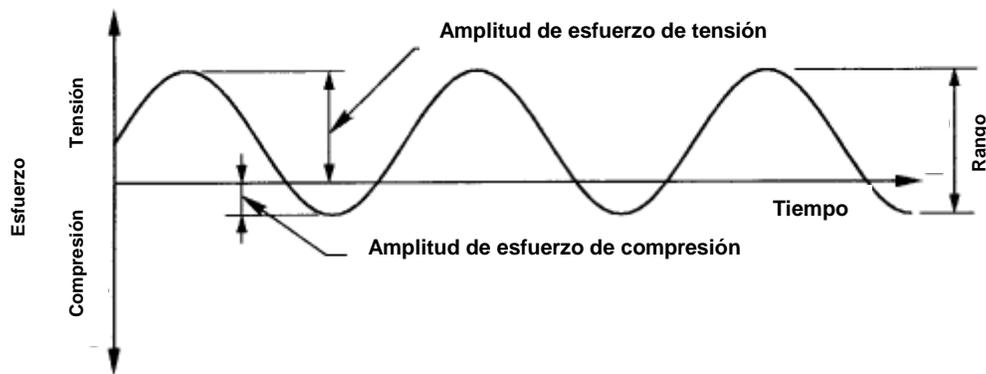


Figura 7. Ciclos con amplitud constante de esfuerzo de tensión y compresión.

Se puede olvidar del límite de su resistencia como factor importante para calcular el comportamiento de la fatiga, pues ésta, es una función del tamaño del elemento, ya que a mayor tamaño, mayor será la probabilidad de que exista una zona defectuosa o débil, y las grietas por fatiga iniciar en cualquier defecto existente (Bulson, 1996).

2.4.2 Fundición de aluminio

Los cuatro métodos de fundición principales son moldeo en arena, fundición a baja y alta presión, y fundición en coquilla. Generalmente, se requiere de maquinado después de ser fundido y moldeado.

La fundición y el moldeo en arena no tienen repercusiones al medio ambiente ya que cuando se utilizan compuestos orgánicos como resina, se emplean equipos especiales que limpian las emisiones y descargas que revisan que los límites de emisiones no se excedan.

Las aleaciones fundidas secundarias, son mayormente usadas ya sea como metal fundido directamente de plantas o en forma de lingotes para fundir piezas y productos específicos. Las aleaciones más comunes que se añaden al aluminio son el cobre, magnesio y silicio. Por razones de calidad de los granos, sustancias como el estroncio, el sodio o el titanio solo se añaden en pequeñas cantidades (Hydro, 2012).

De acuerdo a Dai (2012), Los productos generados por la fundición en horno se divide en tres categorías: (1) aluminio fundido, (2) gases liberados i.e. CO₂, SO₂, y fluoruro, y (3) mezcla semi-sólida de aluminio y escoria.

Se ha sugerido en la literatura que la oxidación química y física inducida durante la formación de escoria, contribuye a casi más del 50% de las pérdidas totales del metal durante una fundición primaria. Lo cual representa una gran pérdida financiera para la industria del reciclaje, la cual produce aproximadamente 3.2 millones de toneladas de escoria de. Mucho interés se ha mostrado en la recuperación del aluminio contenido en esta escoria, pues en escoria blanca, se puede recuperar hasta el 80% en peso. En orden de recuperarlo, es calentada en un horno rotatorio con sales añadidas. Esto ayuda a separar el aluminio de los óxidos sólidos y de la oxidación. Después de que el aluminio es recuperado, el resto de la escoria y las sales que fueron añadidas son vertidos en rellenos o vertederos de desperdicios para este fin (Dai, 2012).

2.5 Nanotubos de carbono.

Los **nanotubos de carbono** han emergido como una clase de material para proporcionar soluciones estructurales ingenieriles y aplicaciones funcionales debido a su alta resistencia mecánica, eléctrica y conductividad térmica (Sinha Ray & Okamoto, 2003). El interés en usar nanotubos de carbono como un agente reforzante en una matriz metálica, surge del éxito descubierto al estudiar su incorporación en una matriz polimérica de alto desempeño (Paul & Robeson, 2008).

Los nanotubos de carbono (NTC) fueron descubiertos por Sumio Iijima, un renombrado físico japonés en el año de 1991 y desde entonces sus aplicaciones y comprensión de propiedades han progresado en gran medida. Se podría pensar, que al estar familiarizado con el grafito, posea propiedades similares, sin embargo no sucede esto pues su color no es negro, sino marrón oscuro debido a que absorben radiación del espectro visible suponiéndose entonces que su estructura electrónica también cambia (Vasilievna Robledo & Ortíz, 2004).

El motivo por el que su resistencia es tan alta, es que su morfología carece de defectos provocando que los esfuerzos sean uniformemente distribuidos por todo el cristal. Una de las ventajas de sus numerosas propiedades es que su relación longitud-radio (132,000,000:1) permite que se puedan controlar unidireccionalmente en los materiales resultantes de sus compuestos (Vasilevna et al., 2004).

Se puede decir que un NTC es tan delgado como 10,000 veces un cabello humano y además hueco en medio (F.Pacheco-Torgal, Dimanti, Nazari, & Granqvist, 2013).

Son parte del grupo de los materiales más duros y conocidos a la fecha y mantienen grandes promesas para compuestos reforzados a base de cemento. Son alótropos de carbono con una geometría cilíndrica-tubular con un diámetro que va de 1 a 100 nm y una longitud que supera algunos milímetros. La proporción (longitud-diámetro) que supera 100,000,000:1 ha sido reportada en la literatura donde se reconoce su capacidad de “autorecuperación” en grietas (crack-bridging) a escalas muy finas (Constantinides, 2010).

Entre las variedades de los nanotubos, existen aquellos de pared múltiple en su estructura (MWCNT o multiwalled carbon nanotubes) los cuales cuentan con múltiples paredes concéntricas (simulando un periódico enrollado). Éstos reportan valores de hasta 1 TPa en su módulo de elasticidad y 60 GPa en resistencia a la tensión.

La reducción mecánica de MWCNT's se debe a las débiles interacciones entre los tubos adyacentes. Esta limitación, recientemente se ha dirigido a la aplicación de alta energía de irradiación al electrón que conecta la capa exterior y los tubos más internos incrementando efectivamente la fuerza de estos materiales alrededor de 60 Gpa (Constantinides, 2010).

Incluso en la era Neandertal, se elaboraban nanotubos de carbono disperso y defectuoso, dentro del hollín que se encontraba en las fogatas.

2.5.1 Métodos de síntesis de nanotubos:

Uno de los primeros métodos de síntesis de los nanotubos de carbono fue por medio de la pirólisis de electrodos del grafito en atmósfera controlada de helio, a partir de donde se han ido sintetizado de distintos métodos ya sea catalíticamente, por procesos donde se descompone el monóxido de carbono a altas presiones, además de altas temperaturas o con uso de metales de transición (Alcca Quispe, 2005). Del cual se desprenden los demás intentos de síntesis de NTC, que a continuación se describen.

2.5.1.1 Descarga de arco

Consiste principalmente en conectar a una fuente eléctrica de 20 a 50 V, dos barras de grafito con un rango de diámetros de 0.5 a 40 mm separándolas unos cuantos milímetros y activar un interruptor. Esto ocasiona la aparición de una chispa de corriente DC de 50 a 120 A entre ambas barras con una presión base de 400 torr de helio y la evaporación del carbono en un plasma caliente.

Lo que prosigue es que una parte de ello se condensa nuevamente y se forman nanotubos de carbono. Este proceso permite un rendimiento del 30% en peso sin embargo los nanotubos tienden a ser cortos (50 micras o menos) y se depositan en tamaños y formas aleatorias, además de que se llegan a formar fullerenos y glóbulos amorfos (Mart, Ca-, Fair, Arqu, & Sebasti, 2007).

La ventaja principal de este método es que, debido a las altas temperaturas y a los catalizadores metálicos en las barras, los nanotubos producidos tienen tanto pared singular como múltiple.

En cuanto a los diámetros de los nanotubos obtenidos, éstos pueden variar de 7 Å a 16.5 Å donde su crecimiento sucede comúnmente de 1µm cada 0.1 s, traducándose a que cada 10^{-5} s un nuevo anillo de carbono, aparece.

2.5.1.2 Ablación Laser

Este proceso consiste en vaporizar el grafito a través de radiación de un pulso láser con ayuda de un reactor a temperatura relativamente alta sometido a una atmósfera inerte. La formación

de los nanotubos comienza con la condensación en las paredes del reactor al momento en que la vaporización del grafito y la superficie fría se encuentran (González & González, 2008).

2.5.1.3 Deposición química de vapor

O CVD por sus siglas en inglés (Catalytic Vapor Phase) tuvo sus inicios en la sexta década del siglo XX, sin embargo, no fue hasta 40 años después que los nanotubos pudieron sintetizarse adecuadamente con este proceso. En este método, se debe iniciar con una capa de algún metal como el oro, níquel o cobalto (o incluso una combinación de ellos).

El tamaño de las partículas de estos metales influyen directamente en los diámetros de los nanotubos que se formarán por este método. Se añade agua sobre la capa de metal calentada arriba de los 700°C. Se necesita la interacción de dos gases como nitrógeno, hidrógeno y amoníaco con etileno, metano, acetileno y etanol. El gas con contenido carbónico fractura la superficie con partículas catalizadas de modo que el carbono se transporta a los límites de dicha partícula formando nanotubos (Samad et al., 2014).

A continuación, se presenta en la Tabla 5, una comparativa entre los métodos de síntesis de nanotubo de carbono donde se describe el proceso de síntesis, el producto obtenido, así como ventajas y desventajas observadas en cada una.

Tabla 5. Propiedades de los nanotubos por tres métodos (González & González, 2008).

	Descripción	Producto	Ventajas	Desventajas
Ablación Láser	Condensación de átomos de carbono producidos por la evaporación a temperaturas entre 3000°C y	NCPS (nanotubos de carbono de pared singular): longitudes del orden	Para NCPS se hace posible controlar el diámetro. Los nanotubos presentan	Método costoso ya que requiere un láser de alta potencia.

	4000°C de un precursor sólido tal como el grafito. La fuente de energía es un láser de alta potencia.	de los 5-20 micrones y diámetros del orden de 1-2 nm. NCPM (nanotubos de carbono de pared múltiple): longitudes del orden de los 300 nm, con un número entre 4-24 capas y diámetros internos entre 1.5-3 nm.	pocos defectos.	
Descarga de Arco	Condensación de átomos de carbono producidos por evaporación de grafito haciendo uso de una descarga eléctrica entre dos electrodos de grafito.	NCPS: Tubos cortos con diámetro entre 0.6 y 1.4 nm. Se requiere catalítico metálico. NCPM: Tubos cortos con diámetros internos entre 1 y 3 nm y diámetros externos del orden de los 10 nm.	Pocos defectos estructurales para los NCPS. Para NCPM no se requieren catalíticos en el precursor. Es un método económico.	No pueden ser controladas las dimensiones del nanotubo. Resultan tubos muy cortos y crecen de manera desordenada en todas direcciones.
Deposición Química por Vapor	Descomposición de un vapor o gas precursor que contiene átomos de	NCPS: Tubos largos con diámetros	Es un método simple y económico para producción a	Los tubos suelen ser de pared múltiple y

	carbono (hidrocarburo) en la presencia de un catalizador metálico sobre un sustrato	entre 0.6 y 4 nm. NCPM: tubos largos con diámetros entre 10-20 nm.	escala industrial de tubos de carbono. Se hace posible controlar el diámetro de NCPS. Se pueden producir tubos alineado verticalmente.	con defectos estructurales.
--	---	---	--	-----------------------------

2.6 Compositos Al-NTC

Compuestos de aluminio y NTC han empezado a ser altamente empleados en estructuras y funcionamiento de industrias de transporte, defensa, aeroespaciales, electrónica, etc. (Nie et al. 2011).

La evidencia reciente sobre la materia sugiere que, de acuerdo a investigaciones recientes, prolifera la preocupación sobre algunos problemas que se han encontrado durante el estudio de este compuesto como la mojabilidad que existe entre el aluminio y el carbono se cataloga como pobre, a altas temperaturas el carbono reacciona con el aluminio formando alúmina el cual disminuye las propiedades del compuesto y algunos tipos de carbono presentan anisotropía, lo que significa que sus propiedades tienen un desempeño excelente en una o dos direcciones mientras que en la otra serán deficientes (Huang et al., 2014).

A pesar de todo, se han podido encontrar soluciones a estas situaciones permitiendo que su uso siga siendo factible y conveniente. Por ejemplo, se aplica una presión adecuada para promover la infiltración limitando el tiempo de contacto a altas temperaturas, o usando métodos de fabricación a bajas temperaturas e incluso agregando elementos con el magnesio o el silicio se ha demostrado que mejora la mojabilidad.

Diferentes autores han utilizado compuestos de nanotubos de carbono en una amplia variedad de formas para reforzar materiales básicos como metales, cerámicos o polímeros y numerosos estudios han demostrado, que el compuesto de nanotubos de carbono y aluminio resulta en un material cuyas propiedades se ven ampliamente mejoradas.

El que sus propiedades le permitan ser apto para ser empleado en circunstancias donde se requiera un material de bajo peso y alta capacidad elástica y resistencia a la tensión, no pareciera nada ilógico pensar que este material es adecuado también para emplearse en la construcción. Específicamente en estructuras ligeras o alivianadas donde las cargas aplicadas son repartidas igualitariamente en todos sus miembros como las mallas espaciales, capaces de cubrir grandes luces sin necesidad de colocar columnas intermedias entre claros (Maydana, 2009).

Aunque se han hecho progresos considerables en muchas cuestiones importantes, permanecen todavía sin resolver pues la literatura no ha mostrado aún estudios donde se pone a prueba un compuesto de aluminio reciclado a partir de latas de bebidas reforzadas con nanotubos de carbono. En todos los casos, el aluminio es obtenido a partir del mineral, sin embargo, se ha podido comprobar que el hecho de que el aluminio sea reciclado, sus propiedades se mantienen iguales.

Joshi, Upadhyay, (2014) aseguran que las propiedades de compuestos reforzados con NTC pueden ser estimadas con la regla de mezclas (ROM por sus siglas en ingles “Rule of Mixtures”):

$$\omega_C = \omega_{NTC}V_{NTC} + \omega_m(1 - V_{NTC}) \quad (30)$$

Donde ω_C es la propiedad específica por evaluar del compuesto tal como densidad, conductividad y resistencia, ω_{NTC} es la propiedad de los nanotubos de carbono

correspondientes, ω_m es la propiedad del aluminio y V_{NTC} es la fracción de volumen de los nanotubos añadidos.

Un contenido excesivo de NTC puede resultar en aglomeraciones inconvenientes dentro de la matriz de aluminio lo que degradaría los resultados en las pruebas de tensión (Chen et al. 2015).

Algunos factores que reducen las capacidades de refuerzo de los NTC dentro de una matriz son: una débil unión interfacial, baja dispersión, la orientación y el tipo de los NTC así como la interacción natural entre la matriz y los NTC (Haggenmueller et al. 2000, Bower et al. 1999, Wagner et al. 1998, Lourie y Wagner, 1998 y Jia et al. 1999).

Un parámetro crítico que controla la eficiencia de la transferencia de carga en la matriz reforzada es el esfuerzo cortante interfacial, ya que este afecta significativamente las propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad, la resistencia a la tensión y la rigidez. Es por ello, que para un mejor desempeño de los nanotubos de carbono como reforzantes dentro de una matriz de aluminio, es importante conocer las características interfaciales dentro de ella.

Joshi y Upadhyay (2014) propusieron un modelo que aprovecha el gran módulo de Young y capacidad de carga de los nanotubos de carbono por medio de una transferencia eficiente de esfuerzos dentro de la matriz a los nanotubos.

La dinámica molecular ha sido empleada para estudiar los fenómenos a escala nanométrica del compuesto, mientras que la mecánica del medio continuo (MDM) se ha aplicado para

estudiar el comportamiento de nanoestructuras a un nivel macroscópico (Joshi y Sharma,2005).

Sin embargo, las simulaciones que ofrece la dinámica molecular se puede limitar únicamente a pequeños volúmenes debido a su intenso trabajo computacional, mientras que las aproximaciones derivadas de la MDM han proporcionado simulaciones macroscópicas aceptables a los compuestos reforzados con NTC.

En el trabajo realizado por Joshi y Upadhyay, se estudió el efecto de la interfase en las propiedades mecánicas de los compuestos reforzados con NTCPM (MWCNT) por medio de una simulación numérica de un elemento volumétrico representativo de tres fases como se muestra en la Fig. 8.

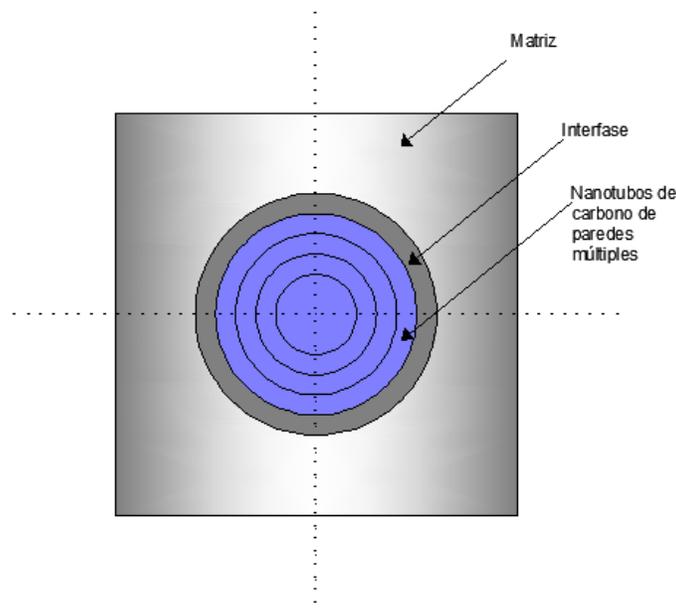


Figura 8. Elemento volumétrico representativo donde se muestra la matriz, la interfase y las paredes múltiples del nanotubo de carbono.

Los nanotubos de carbono de pared múltiple están compuestos por capas concéntricas de grafito con una muy baja interacción de tipo Van der Waals entre cada una pero con una unión covalente de átomos dentro de sus capas extremadamente fuerte. Estas interacciones fueron simuladas por medio de elementos tipo resortes.

Estos mismos autores reportan en trabajos previos que bajo compresión axial, la carga es transferida de la matriz a la capa externa y esta se va transmitiendo a las capas interiores, mientras que frente a esfuerzos de tensión, las capas internas no contribuyen en la transferencia de la carga, únicamente las externas trabajan. Todo esto, asumiendo una unión perfecta entre nanotubos y matriz (Joshi, Upadhyay, 2014).

Lo que realmente sucede es que se desarrolla una capa entre la superficie del nanotubo y la matriz que funciona como un *buffer* entre la matriz y la fibra donde sus propiedades son críticas para el desempeño total del compuesto (Yang, Pitchumani, 2004).

Joshi y Upadhyay (2015), evaluaron el módulo de Young del compuesto usando la regla de mezclas modificada para tomar en cuenta la interfase y su efecto:

$$E_z = E_{\text{compuesto}} = E_{NTC}V_{NTC} + E_{\text{interfase}}V_{\text{interfase}} + E_{\text{matriz}}V_{\text{matriz}} \quad (31)$$

De la literatura, se obtiene que las propiedades observadas de la interfase se derivan de las fibras y de la matriz, es decir que se encuentran en medio de sus valores.

Elementos como la dispersión, contenido, diámetro, alineación, tipo, y estado de daño de los nanotubos de carbón reportan usar parámetros de gran importancia en su desempeño mecánico y conductor (Chen et al. 2015).

Chen et al. (2015) realizó pruebas de tensión en tres muestras de 3.0 mm de diámetro y una longitud inicial de agarre de 15.0 mm, de donde obtuvo un promedio de su Resistencia a tensión.

2.7 Teoremas Especiales Aplicables a las Armaduras

Las armaduras suelen ser un elemento estructural que permite adaptarse a condiciones donde se busca soportar cargas elevadas y al mismo tiempo ser estructuras ligeras. Estas mismas características son las que proporcionan los nanotubos de carbono. A continuación, se listan algunos teoremas aplicables a las armaduras.

- a) La componente de una fuerza sobre un eje a 90° con respecto a la dirección del miembro es cero, porque, por grande que sea la fuerza, al multiplicarse ésta por el coseno de 90° el resultado será cero. Una fuerza en un plano no puede tener componentes en un plano normal que la contiene. Además, una fuerza en un plano no puede causar momentos respecto a ningún eje en su plano porque o intersecta al eje o bien, es paralela a él.

De lo anterior resulta evidente que si varias barras de una armadura concurren en un nodo, de las cuales toda, excepto una, se encuentran en el mismo plano, la componente de la fuerza en esta barra normal al plano de las otras barras, debe ser igual a la suma de las componentes de las fuerzas externas en el nodo, normales al mismo plano. Si no hay fuerzas externas presentes, la barra no tiene fuerza.

- b) Si hay un nodo en la armadura que no contiene cargas externas y en la que se ha visto que todas, excepto dos barras, no tienen fuerza, entonces esas dos barras también deben tener fuerza nula, a menos que sean colineales.

Este último teorema puede probarse usando las ecuaciones de equilibrio estático. (Nelson & McCormac, 1990)

2.8 Importancia del Módulo de Elasticidad en un material

El comportamiento elasto-plástico de los materiales es descrito por la curva esfuerzo-deformación medida en las pruebas de tensión.

En una prueba de tensión, el espécimen es alargado a una velocidad constante, y la extensión ΔL y la fuerza aplicada son medidas.

Para evitar la falla en la zona de agarre, los especímenes deben ser más delgados en la zona de transición donde los diferentes diámetros son tan suaves que se evita un cambio abrupto en la sección transversal ya que esto podría provocar concentraciones de esfuerzos que induzcan a una falla local.

La curva esfuerzo-deformación de la mayoría de los metales es del tipo mostrado en la Figura 9.

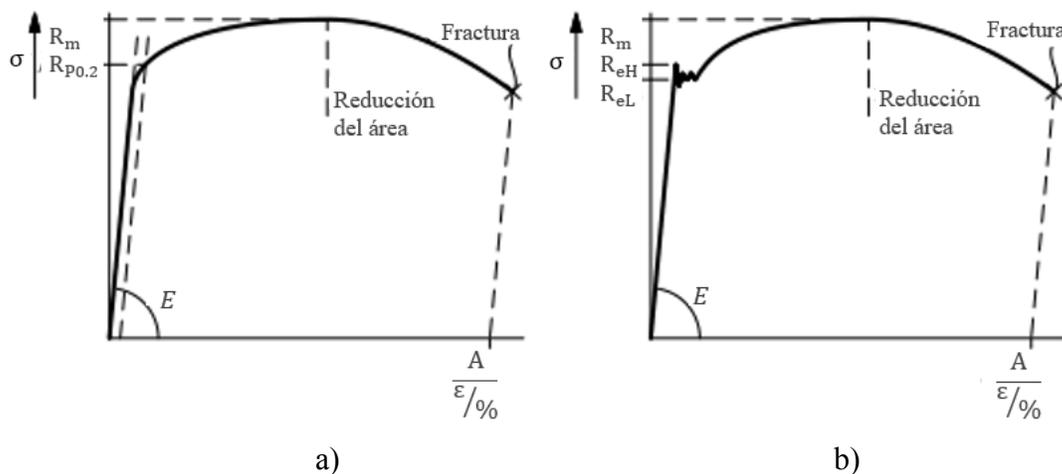


Figura 9. Curva esfuerzo-Deformación en metales dúctiles. a) Metal dúctil sin punto de fluencia aparente, b) Metal dúctil con punto de cedencia aparente

El comportamiento de los especímenes es casi puramente elástico al inicio, con una pendiente de esfuerzo-deformación igual al módulo de Young E .

Con el incremento de la deformación, la deformación plástica comienza gradualmente pero aún no se puede determinar el punto exacto de fluencia. En aplicaciones ingenieriles, existe una tolerancia de deformación de 0.2%, donde en la deformación plástica se usa para definir el esfuerzo donde la deformación plástica inicia. Este esfuerzo es llamado Límite de Fluencia del material (Rösler, Harders y Bäckers, 2007).

Para asegurar una deformación estable del espécimen incluso después de que la fuerza aplicada comience a disminuir, la prueba de tensión debe ser con deformaciones controladas.

La prueba de tensión finaliza cuando el espécimen sufre una ruptura. La elongación es medida relativamente a la longitud original de referencia.

La habilidad de un material de deformarse plásticamente antes de su fractura es llamada “ductilidad”. A mayor elongación previa a la fractura, mayor dúctil es el material sometido a pruebas. Materiales con baja ductilidad se conocen como frágiles.

El nivel de estrés que el material puede soportar antes de fracturarse es su capacidad de carga.

3 METODOLOGÍA

A continuación, se explican los pasos llevados a cabo durante esta investigación, los resultados obtenidos se podrán observar a detalle en la siguiente sección.

3.1 Material y Equipo

Se lista el material utilizado durante el estudio:

Limpieza de latas	Fundición	Formación de composito
1000 piezas de latas de aluminio de bebidas	Horno de crisol A-60 de carburo de silicio a nivel de piso	Acetona pura
Lijas de agua del no. 1000	Sales fundentes	Papel aluminio
Tijeras	Agentes desoxidantes	Nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT) marca Sigma Aldrich
Pinzas eléctricas o cuchillo	Lingotera de acero de 9 x 11 x 2.5 cm ³	
Agua y jabón	Arena sílice	
	Bentonita (4%)	

Se lista el equipo utilizado durante el estudio:

- Sonotrodo marca hielscher modelo UP200Ht
- Cortadora Metacut 251 marca Metkon
- Microdurómetro marca Shimadzu modelo HMV-G.
- Máquina Universal Instron modelo 5969 de 50KN
- Microscopio óptico

3.2 Reciclaje, limpieza, deslacado y corte de latas de aluminio.

Es esencial que las latas de aluminio recolectadas se encuentren íntegras, es decir que de ninguna manera hayan sido apisonadas como comúnmente se hace en este tipo de actividad. Esto se debe a que las latas deberán ser limpiadas, deslacadas y cortadas para asegurar que el proceso de fundición se logre de la mejor forma posible. Una vez colectadas las muestras, se eliminó cualquier tipo de presencia orgánica que pueda existir dentro o fuera de la lata, por lo que el agua fue suficiente para una limpieza óptima. Las latas se recolectaron bimensualmente en eventos sociales por aproximadamente 12 meses, obteniendo aproximadamente 1000 piezas.

Previo a la fundición de las latas, es necesaria la eliminación de la laca o pintura de la lata para minimizar la producción de escoria y asegurar un mejor rendimiento de recuperación de aluminio.

Más de un método alternativo fue puesto a prueba para comparar la eficiencia en tiempo en la remoción de la laca de las latas, sin embargo se encontró que para este proceso lo más conveniente era hacerlo manualmente con ayuda de una lija de agua, teniendo siempre el cuidado de que la fuerza empleada no provoque fisuras en la lata y que además el lijado sea en una sola dirección para evitar también ralladuras inconvenientes en la superficie del aluminio (Shaymaa Abbas Abdulsada, 2016)

Con sumo cuidado mediante el uso de pinzas de corte para metal, y siempre con equipo de protección, se retiraron las partes duras de la lata, es decir la base y boquilla ya que estas partes están aleadas con magnesio (para proporcionarle esa dureza), Es importante procurar que se retire lo menor cantidad posible de aluminio durante el corte. Al final se obtiene una hoja de aluminio la cual será depositada dentro del horno de fundición.

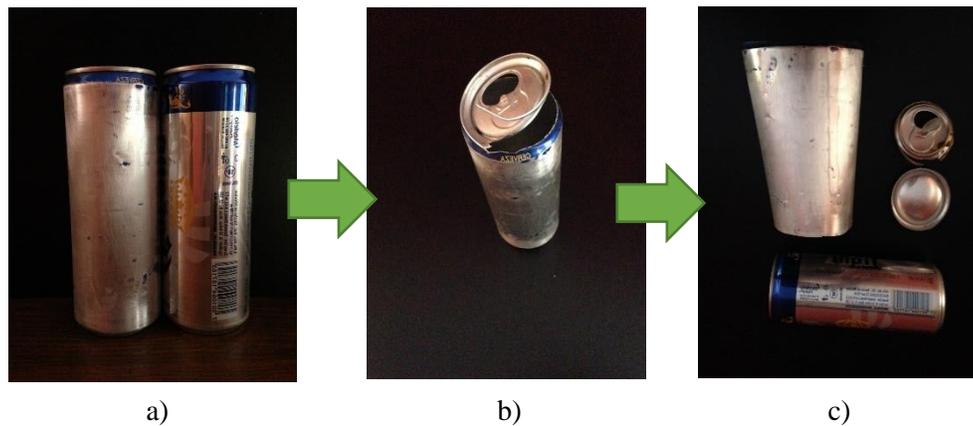


Figura 10. Proceso de reciclaje y arreglo de latas de aluminio para fundición. a) deslacado, b) retiro de tapas,, c) parte de lata usada para fusión.

3.3 Fundición del aluminio reciclado recuperado y formación del compuesto Al-NTC

El aluminio tiene un punto de fusión de $660.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que un horno de crisol alcanza los 900°C aproximadamente, suficiente para conseguir un fluido de metal para verter en los moldes correspondientes. Se empleó un horno de crisol A-60 de carburo de silicio, colocado a nivel de piso el cual fue precalentada de un color gris hasta que alcanzó un color rojo, se procedió a cargar con las latas.

El fluido metálico cuenta con un excedente de temperatura para compensar las pérdidas ocasionadas por convección, radiación y conducción.

Después de que el aluminio es fundido, es necesario retirar la escoria y para tal efecto es necesario agregar sales de fundente que ayuda a remover las impurezas presentes como polvo, grasa, óxidos, silicatos, etc.

Posteriormente debe ser desgasificado con una agente desoxidante. Si el aluminio no se encuentra en la temperatura adecuada, el metal no fluirá apropiadamente causando un metal frío, canales de alimentación tapados, piezas incompletas, contracciones entre otros defectos de acabado. La temperatura del metal se mantuvo a 840°C.

Se crearon lingotes de aluminio de 9 x 11 x 2.5 cm³, a los cuales se les dejó enfriar dentro del molde a temperatura ambiente siendo retirados previamente del molde para observar las diferencias en las propiedades de ambos métodos de enfriamiento.

Para la formación del composito Al-NTC, se utilizó 0.0075%, 1.5%,3% v/v de nanotubos de carbono en fundiciones con aluminio (Asgharzadeh, Joo, & Kim, 2014)(Chen et al., 2015)(Kang, Kim, Park, & Lee, 2016) .

Los nanotubos fueron pesados y mezclados con 50 ml de acetona, sometiéndose a un mezclado por medio de un sonotrodo marca hielscher modelo UP200Ht con potencia de 13W, cavitación del 100% y amplitud del 60% durante 20 min (Samad et al., 2014) , posteriormente se vertió esta mezcla en la copa de 9 cc de un aerógrafo de caída libre marca Trupper con copa de 9 cc .

Se continuó con la dispersión sobre hojas de aluminio de 10 x 10 cm² procurando una capa homogénea sobre toda la superficie de la hoja. Se dejó evaporar la acetona a temperatura ambiente y se hicieron pequeñas pelotas para depositarlas en el horno de crisol durante la fundición (Q. Li, Rottmair, & Singer, 2010).

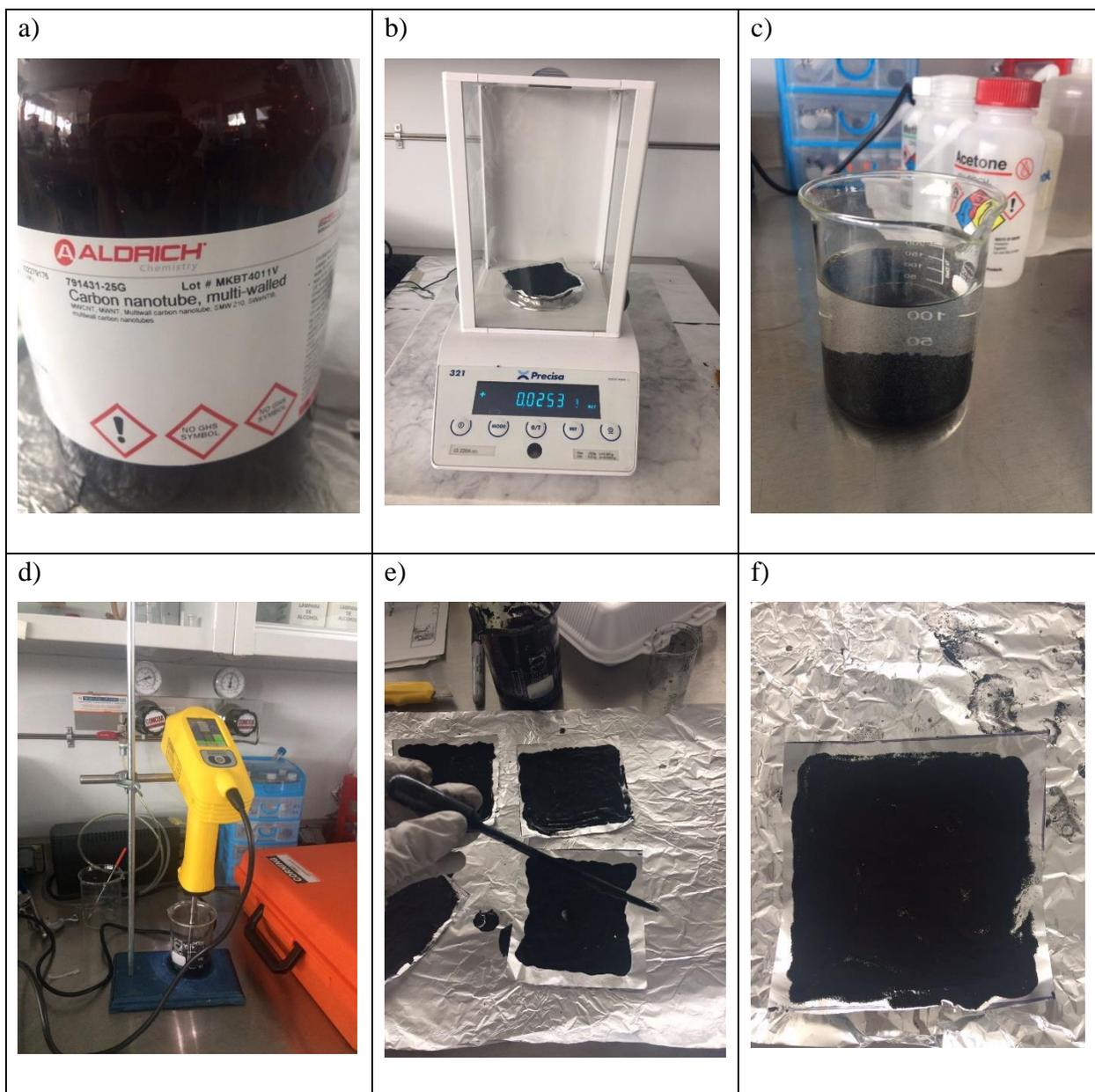


Figura 11. a) Frasco de nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT) marca Aldrich. B) proceso de pesado de nanotubos de acuerdo a su porcentaje en volumen. C) solución de nanotubos con acetona. D) Mezclado en sonotrodo. E) pintado de solución con gotero en hojas de aluminio para vertido en horno de crisol. f) resultado final de hojas de aluminio pintadas de nanotubos de carbono con acetona evaporada.

3.4 Elaboración de probetas

Con el fin de ser usado como molde, se tamizaron aproximadamente 5 kg de arena sílice a través de una malla de alambre en una caja de madera o de hierro y se fue añadiendo agua gradualmente a la arena hasta obtener un 6% de humedad. Se mezcló el agua y la arena con una pala hasta que el agua se distribuyó homogéneamente.

Posteriormente, se mezcló polvo de bentonita (4%) gradualmente. Se debió pisar y compactar enérgicamente la mezcla y después se esponjó con la pala. Por último, se creó la forma deseada previa al maquinado de las probetas en la mezcla con ayuda de un molde de madera para crear la forma dentro de la mezcla de arena y se formaron agujeros a modo de alimentadores donde se vertió el aluminio y el compuesto Al-NTC líquido.

Estas barras fueron torneadas y se les dio la forma adecuada según las siguientes dimensiones especificadas por en la norma ASTM E 8 para probetas redondeadas de las siguientes dimensiones:

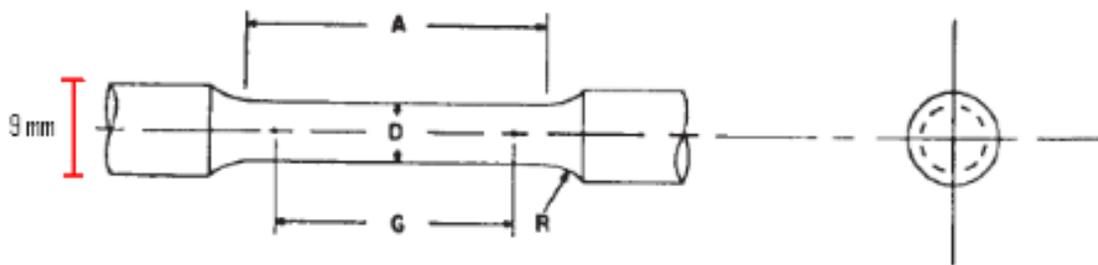


Figura 12. Figura ilustrativa de probetas de tensión y compresión de acuerdo a normas ASTM E8 y E9.

Tabla 6. Dimensiones para probetas de prueba a tensión de acuerdo a la norma E8 de la ASTM.

Diámetro Nominal	Dimensiones (mm)
G- Longitud de Sección	20.00±0.04
D- Diámetro	4.00±0.05
R-Radio de curva	4
A- Longitud de la sección reducida	24

Las dimensiones indicadas se determinan a partir del tipo de agarre de cada máquina universal. En este caso, se utilizó una Instron modelo 5969 de 50KN cuyos agarres permitieron una longitud de probeta de 20 mm \pm 0.04.

3.5 Caracterización Físico-Química del aluminio reciclado y del compuesto Al-NTC

Pruebas de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) serán inducidas a los compuestos para detallar sus elementos y poder verificar las distintas fases y composición de partículas, así como brindar información sobre su constitución interna.

3.6 Caracterización mecánica del Aluminio y del compuesto Al-NTC

Con el fin de encontrar las propiedades mecánicas del material compuesto obtenido, se realizaron los siguientes métodos:

3.7 Prueba de Dureza de Vickers

Con ayuda de una cortadora Metacut 251 marca Metkon, se tomó un lingote de cada grupo y se cortaron rebanadas de 1 cm de espesor. Cada una de estas rebanadas fue sometida a un proceso de pulido para posteriormente ser introducida a un microdurómetro marca Shimadzu modelo HMV-G. .

3.8 Módulo Elástico y Límites de Fluencia

La ductilidad del material, se determinó mediante una prueba de tensión en dos fases con la deformación máxima en la zona elástica hasta su fractura. 1) Elongación: se determinó juntando, después de la fractura, las partes de la muestra y midiendo la distancia entre las marcas puestas antes de la prueba y 2) Reducción del área: se calculó a partir de las mitades rotas de la muestra bajo tensión midiendo el área transversal (Goh, Wei, Lee, & Gupta, 2008).

En la prueba de tensión se preparó una probeta especial colocada en las cabezas de la máquina de prueba y sometida a una carga axial por medio de un sistema de carga de palanca, mecánica o hidráulica.

Para determinar el módulo elástico se retiró una pequeña parte de la carga aplicada sobre la pieza a prueba, la aguja del extensómetro regresará a cero, indicando que la deformación producida por la carga era elástica.

El esfuerzo verdadero se determinó al dividir la carga entre el área transversal existente a esa intensidad de carga. La deformación real se obtuvo al dividir el cambio en longitud entre la longitud precedente.



Figura 13. Diagrama de metodología empleada.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de acuerdo a la metodología descrita en la sección anterior, son:

4.1 Reciclaje, limpieza, deslacado y corte de latas de aluminio

Para realizar la primera fundición, una vez preparadas las latas de aluminio recolectadas, se llevó a cabo en un horno de crisol de gas, a una temperatura de 400°C, posteriormente subió a 660°C y siguió subiendo a 900°C ya que se tienen pérdidas por radiación y convección.

En la Tabla 6 se muestra la masa promedio de dos tipos de latas de aluminio completas y vacías:

Tabla 7. Peso de latas completas.

Tipo de lata	Masa (gr)
lata grande completa	16
lata chica completa	14

A continuación, se muestran los pesos de las latas una vez que han sido preparadas para fundición (Tabla 7):

Tabla 8. Peso de latas preparadas para fundición

Tipo de lata	Masa (gr)
lata grande	8.35614
lata grande sin partes duras	7.10276
lata estándar	6.3318
lata estándar s/ partes duras	5.02942
Peso promedio por lata=	6.70503

Aluminio calculado antes y después de fundirse:

Tabla 9. Peso de aluminio antes y después de fundirse

	Masa	Latas/Lingotes
aluminio prefundido (kg)	5	746
aluminio postfundido (kg)	2.5	6

4.2 Fundición del aluminio reciclado recuperado y formación del compuesto Al-NTC

En esta primera corrida, se fundieron cerca de 750 latas con las cuales se pudieron obtener 6 lingotes de 140 cm³ aproximadamente cada una.

Tabla 10. Peso de latas preparadas para fundición

CALCULO DE PESOS Y CANTIDADES		
Lingotes	6	pzas
Volumen	140	cm ³
Peso total	2,465.97	gr
Peso promedio individual por lingote	410.995	gr
Densidad	2.9	gr/cm ³
Densidad aluminio	2.7	gr/cm ³
Peso promedio por lata	6.70503	gr
Cantidad de latas por lingote	61.2965192	pzas
Cantidad de latas teórica por 6 lingotes	367.779115	pzas
Desperdicio	378	pzas
Rendimiento	49.3194	%

Sin embargo existen otros tipo de hornos como los de reverberación, comúnmente rectangulares donde el calor rebota o se refleja en la tapa removible y en las paredes del horno. El calor se transfiere del flujo de gases a la cámara donde el aluminio fundido. En la parte superior del horno, el gas se mezcla con aire, mientras que en la parte inferior del horno el aluminio sólido se funde y el metal líquido es calentado hasta una temperatura específica (Wang et al. 2013).

De acuerdo a Kennedy (2001), los hornos de crisol de gas tienen la eficiencia térmica más baja de 7 a 19% y un porcentaje de pérdida de 3-4%. El reducido espacio de combustión y el alto precio de la recuperación de escoria son agentes importantes para considerar esa baja eficiencia.

$$Volumen = \frac{h}{3} (A_{BM} + A_{Bm} + \sqrt{A_{BM} \cdot A_{Bm}})$$

siendo h la altura del tronco de pirámide, A_{BM} el área de la base mayor y A_{Bm} el área de la base menor

Tabla 11. Volumen de lingotes obtenidos

VOLUMEN DE LINGOTE		
	trapecio	aletas
Ab	29.75	13
AB	38	1
H	2.5	4.5
v=	84.477424	58.5

Volumen total promedio por lingote obtenido:

$$V_{TOTAL} = 142.977424 \text{ cm}^3$$

4.3 Elaboración de probetas

Las probetas fueron maquinadas por medio de un tornero quien le dio las medidas especificadas en la sección 3.3. Obteniendo un total de 12 probetas de tensión y 12 de compresión, así como 8 discos para pulido.

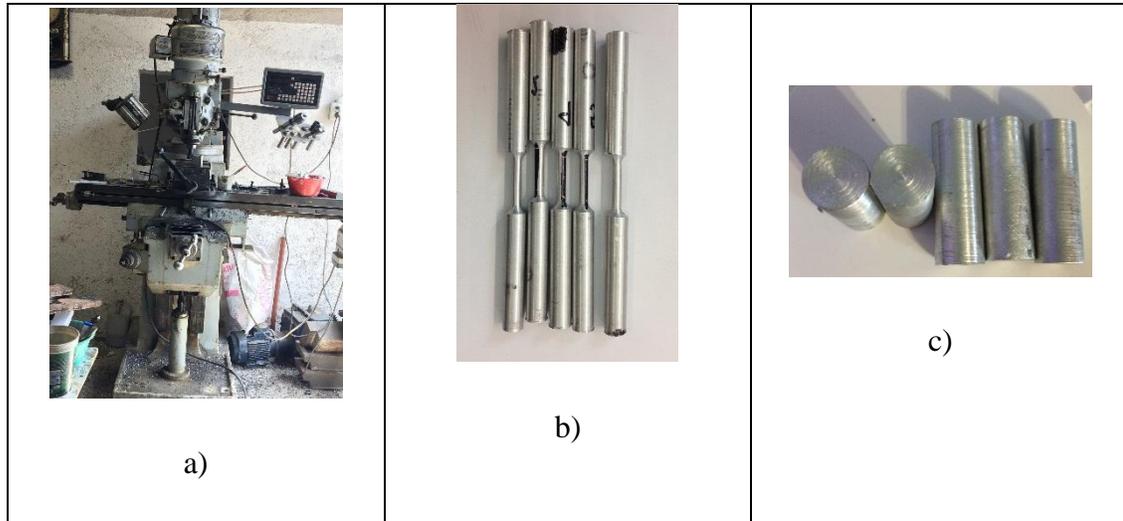


Figure 14. a) Torno donde se maquinaron las probetas, b) Algunas probetas de tensión, c) y d) probetas de compresión.

4.4 Caracterización Físico-Química del aluminio reciclado y del compuesto Al-NTC

La caracterización físico-química del compuesto se muestra a continuación:

4.4.1 SEM y EDS en Escoria de Al reciclado

En la prueba de espectroscopía de energía dispersa (Energy dispersive spectrum) se pueden observar los espectros de Rayos X de las muestras observadas mediante SEM, es decir que

se realizan mapeos superficiales de los elementos presentes en cada muestra. Un rayo X es emitido sobre un punto específico de la superficie en cuestión, provocando radiaciones fluorescentes únicas para cada elemento presente, pudiendo ser medidas estas radiaciones para identificarlos.

En el microanálisis de la Figura 16 se pueden observar los elementos detectados en la escoria producida durante la primera fundición de latas de aluminio. Se encuentran elementos como Cl, K, F, Na, Mg, los cuales pueden atribuirse a los residuos de laca y pintura presente en las latas así como al fundente y desoxidante añadidos durante la fundición. También se encontró que la concentración de oxígeno es de 27.12% y de Al solo un 39.12%.

Estos resultados no resultan alarmantes, sino todo lo contrario ya que al ser la primera fundición, la cantidad de porosidades va disminuyendo conforme más fundiciones se lleven a cabo.

Tabla 12. Tabla de concentraciones de EDS en primera fundición de Al reciclado

Elemento Presente	Porcentaje de masa (%)
O	27.12
F	7.66
Na	0.92
Mg	23.96
Al	39.12
Cl	0.91
K	0.30

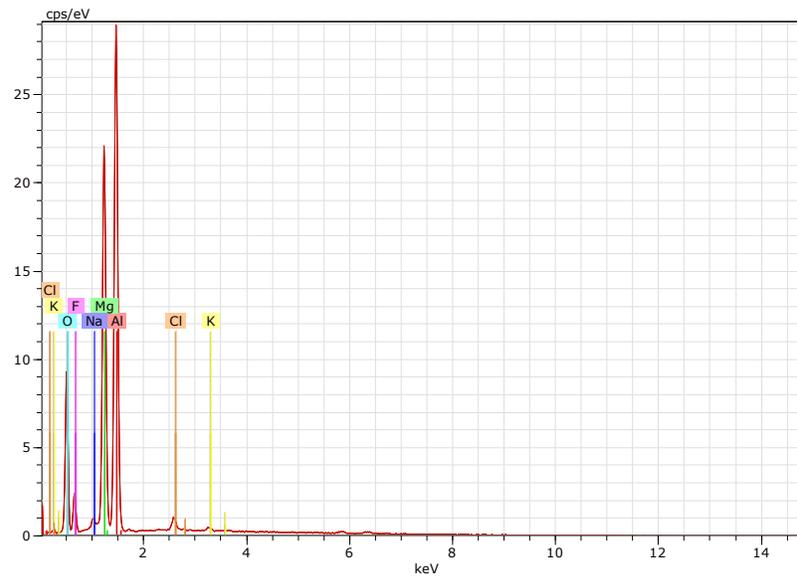


Figura 15. Microanálisis de escoria en fundición de Al reciclado sin nanotubos de carbono.

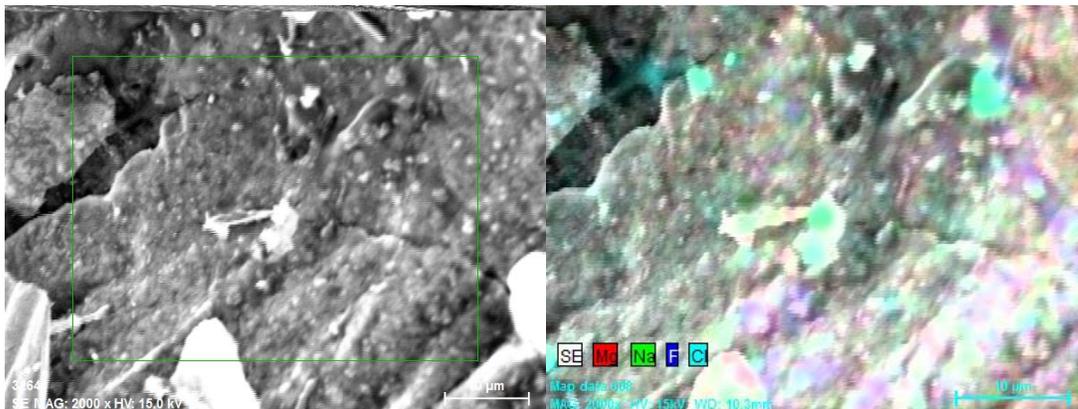


Figura 16. Mapeo SEM de escoria de Al reciclado.

4.4.2 SEM y EDS en Escoria de compuesto Al-0.05%v NTC7

El microanálisis mostrado en la Fig. 17 correspondiente a la escoria producida durante la fundición del compuesto Al reciclado-0.05%V de NTC, se puede observar la ausencia de C

en los elementos encontrados. Esto indica que las probabilidades de que los nanotubos se hayan adherido adecuadamente a la matriz de aluminio son mayores.

Tabla 13. Concentraciones de elementos encontrados en EDS de escoria de compuesto Al-0.05%VNTc

Elemento Presente	Porcentaje de masa (%)
O	8.70
Mg	3.19
Al	88.11

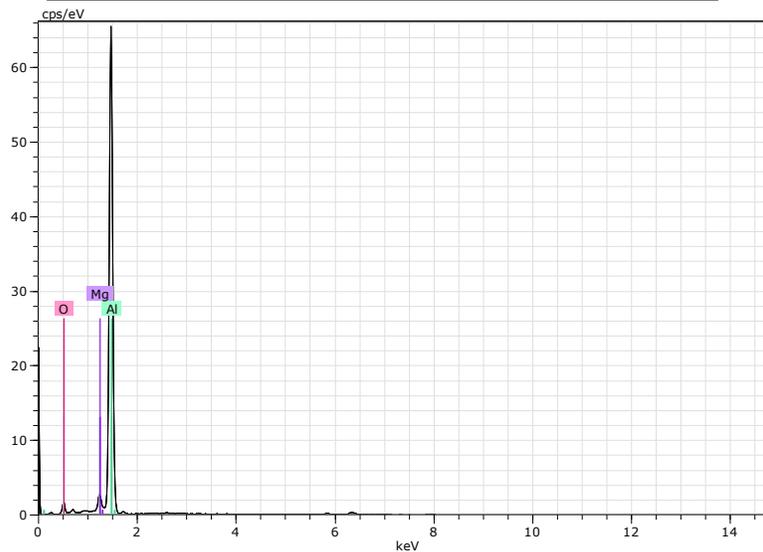


Figura 17. Microanálisis de escoria en fundición de Al reciclado con 0.05%V de NTC.

Es importante observar que, debido a que, para el aluminio reciclado, esta fue su segunda fundición, la concentración de oxígeno ha disminuido considerablemente comparado con el anterior. Esto indica que la porosidad es menor.

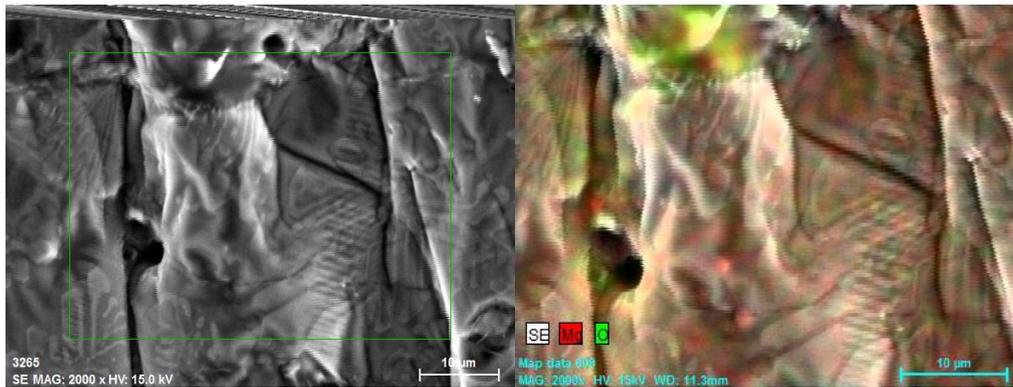


Figura 18. Mapeo SEM de escoria de compuesto Al-0.05%V NTC

4.4.3 SEM en composito Al-1.5%v NTC

Se repite el mismo caso para 1.5% en volumen de nanotubos de carbono, donde en el microanálisis (Fig. 19) correspondiente a una muestra en forma de disco, se observa la ausencia de C en los elementos encontrados, sin embargo, se encuentran rastros de Ag lo cual podría deberse a la alúmina y al paño utilizados durante el proceso de pulido

La Figura 20 muestra la superficie de la muestra. Las líneas corresponden al proceso de lijado para pulido, y las manchas negras a los cúmulos de nanotubos de carbono, las manchas blanquecinas probablemente se deban a la glicerina empleada en el proceso de pulido y las pequeñas de color plateado, a la plata detectada en el microanálisis.

Tabla 14. Concentraciones de elementos encontrados en EDS de escoria de compuesto Al-1.5%VNTc

Elemento Presente	Porcentaje de masa (%)
Al	98.71
Ag	1.05
Mg	0.23

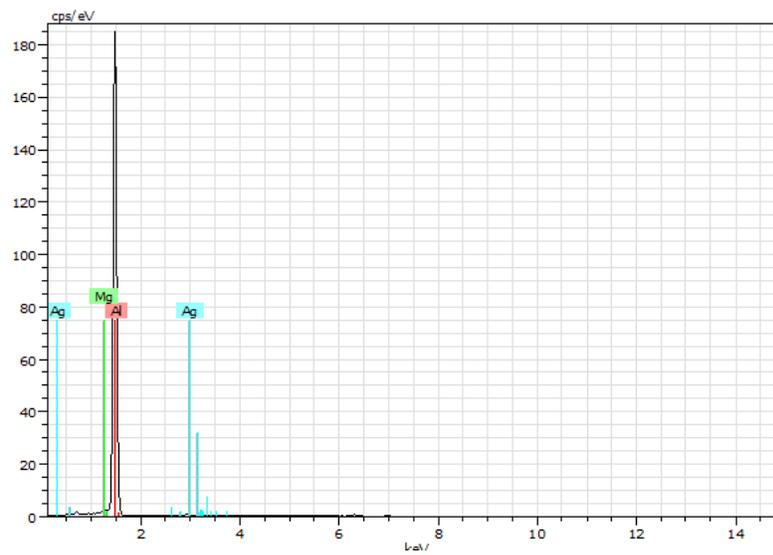


Figura 19. Microanálisis de muestra de Al reciclado con 1.5%V de NTC.

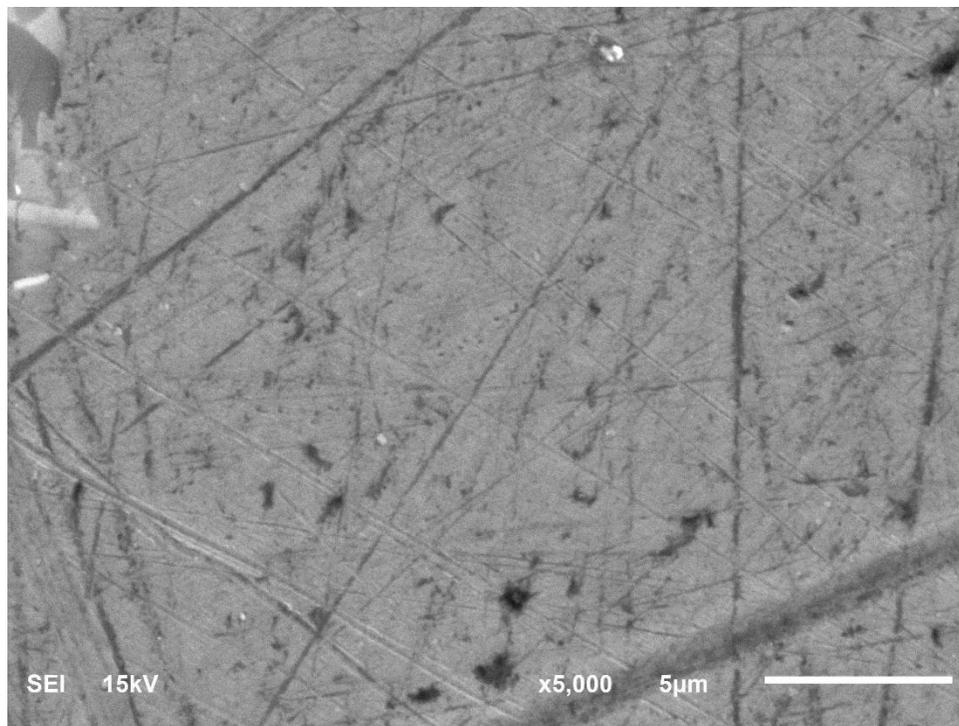


Figura 20. Imagen SEM de la superficie de la muestra de Al reciclado con 1.5%V de NTC.

4.4.4 SEM en compuesto Al-3.0%v NTC

En este último caso se repiten los resultados, donde en la Figura 21 muestra la superficie de la muestra. Nuevamente las líneas que se observan corresponden al proceso de lijado para pulido, y las manchas negras a los cúmulos de carbono, las manchas blanquecinas probablemente se deban a la glicerina empleada en el proceso de pulido y las pequeñas de color plateado, a la plata detectada en el microanálisis.

Tabla 15. Concentraciones de elementos encontrados en EDS de escoria de compuesto Al-3.0%VNTc

Elemento Presente	Porcentaje de masa (%)
Al	98.16
Ag	0.42
Mg	1.42

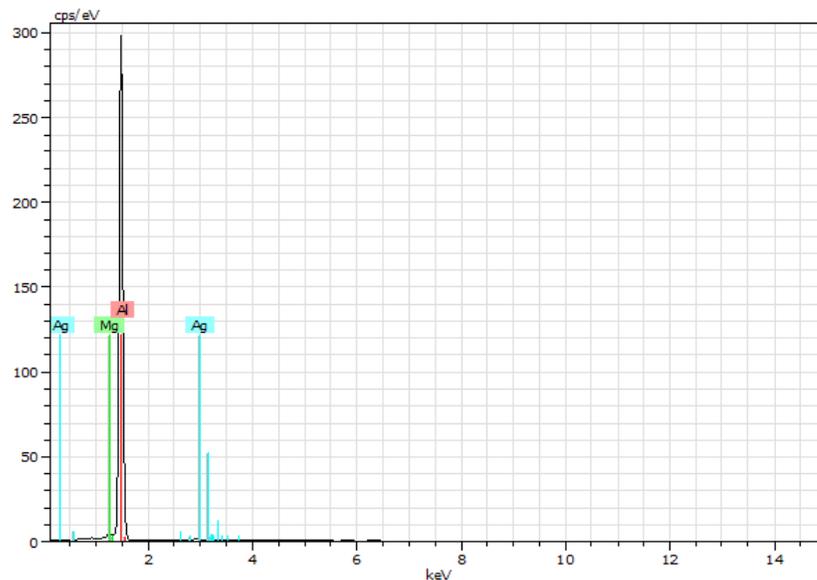


Figure 21. Microanálisis de muestra de Al reciclado con 3.0%V de NTC.

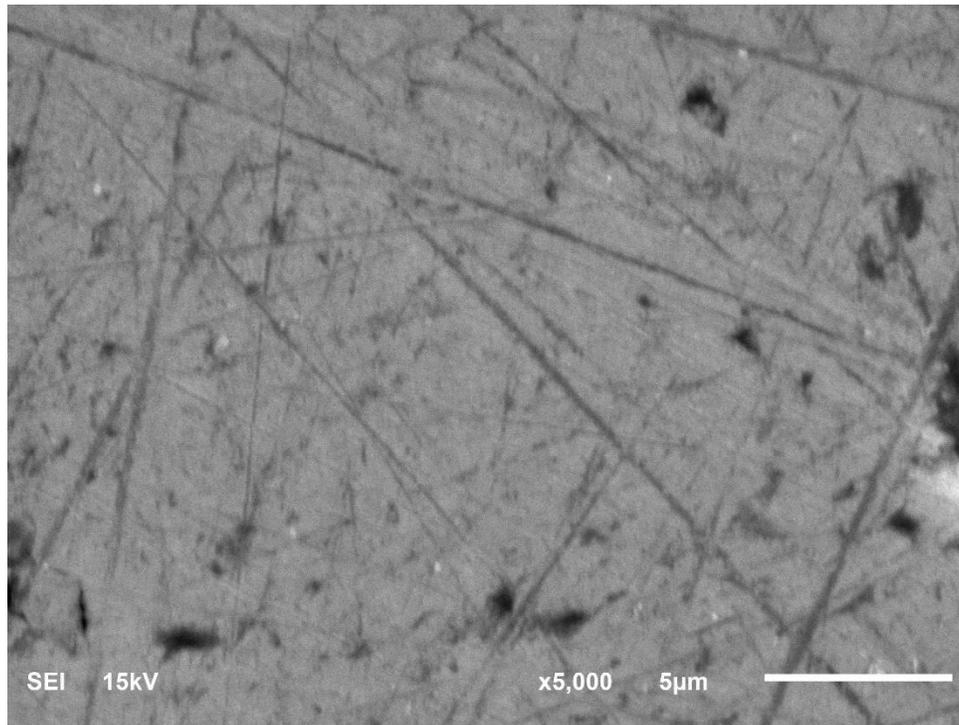


Figure 22. Imagen SEM de la superficie de la muestra de Al reciclado con 3.0%V de NTC.

4.5 Caracterización mecánica del Aluminio y del compuesto Al-NTC

Las soluciones analíticas son preferibles en todos los aspectos para análisis cualitativo de cálculo de datos. Permite al investigador considerar efectos de frontera cuando algunos componentes de la solución son funciones cambiantes.

En muchos casos su rango de cambio no se puede considerar adecuadamente por medio de métodos numéricos convencionales mientras el estudio analítico lo permita (Akimov & Negrozov, 2015).

Se utilizaron teorías de materiales compuestos para calcular analíticamente los valores esperados para cada una de las propiedades que nos interesa obtener, como el módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia y esfuerzo último.

Las teorías utilizadas son Regla de Mezclas, Lamellar, Kerner y Shear Lag. Todas toman en cuenta el volumen del material reforzante y de la matriz, así como los principales valores mecánicos de ambos. Se muestran en las siguientes Figuras 14-16 las predicciones de primera instancia:

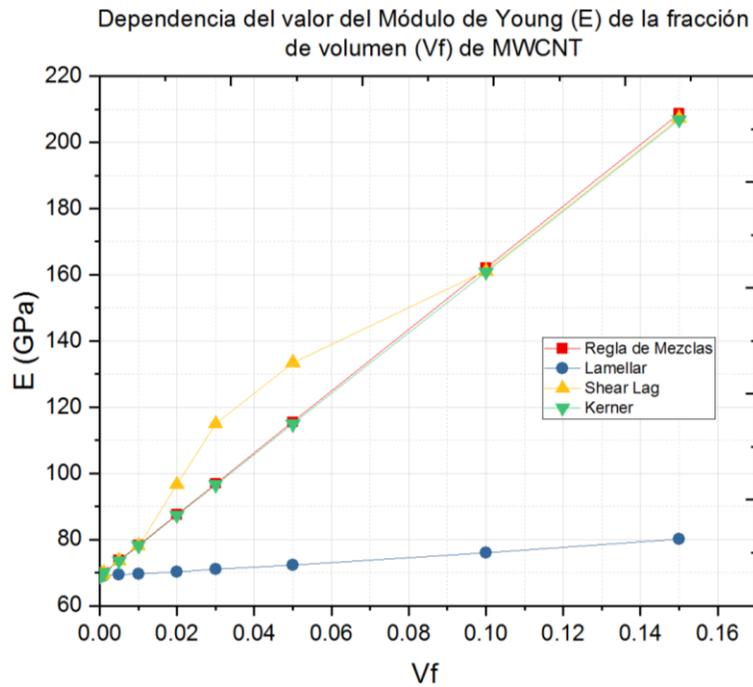


Figura23. Predicción de valores del módulo de elasticidad del compuesto de acuerdo a la cantidad en volumen de nanotubos carbono.

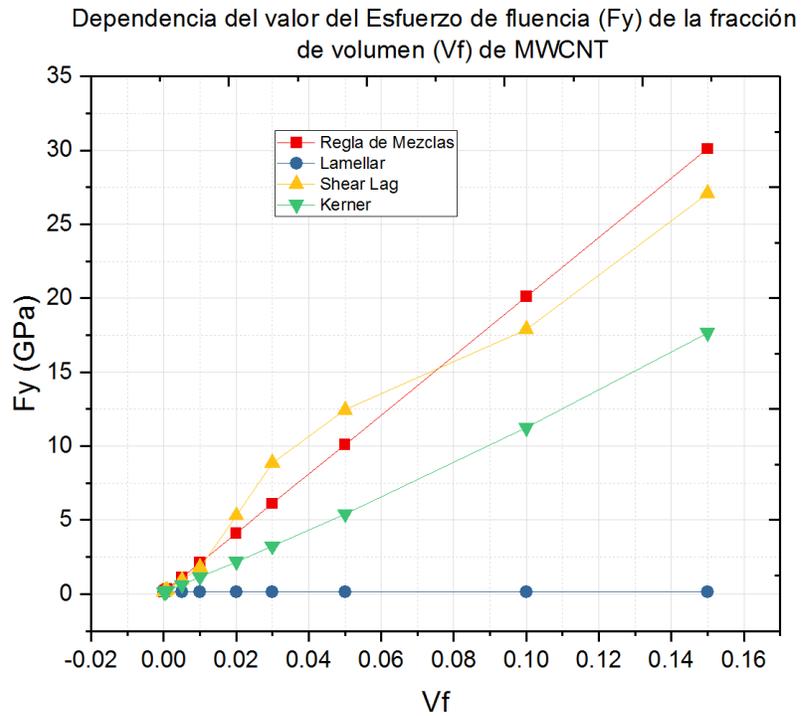


Figure 25. Predicción de valores del Esfuerzo de Fluencia del compuesto de acuerdo a la cantidad en volumen de nanotubos de carbono.

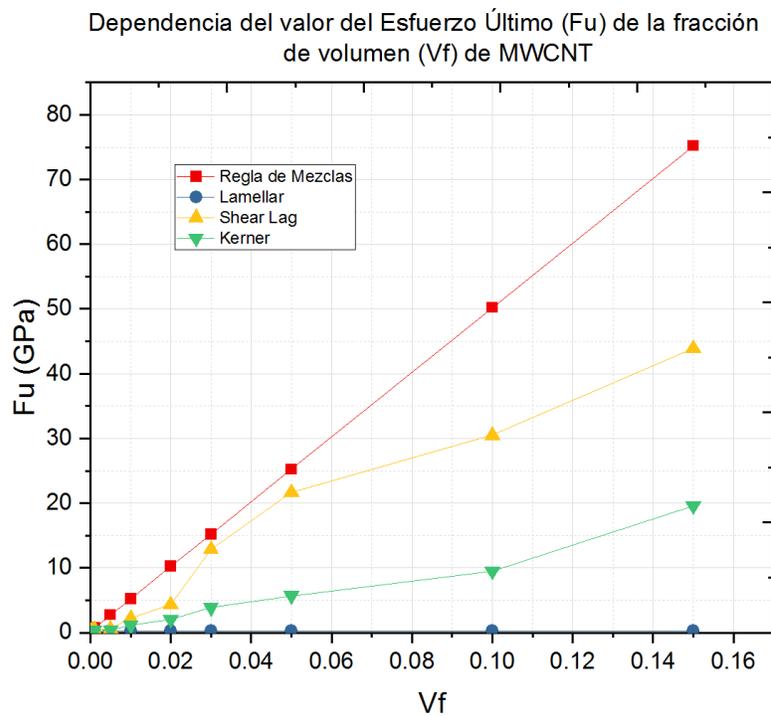


Figure 24. Predicción de valores del Esfuerzo último del compuesto de acuerdo a la cantidad en volumen de nanotubos de carbono.

Si bien estas predicciones calculadas con los distintos métodos antes planteados, que proporcionan un estimado de rangos donde debiera de encontrarse el valor real de determinada propiedad mecánica del compuesto aluminio-nanotubos de carbono, en un inicio de la investigación no se habían considerado.

Fueron protagonistas al observar que no se estaba trabajando con aluminio 6061. Observando la Fig. 17, y realizando un proceso de pulido para poder ver la microestructura del compuesto, se pudo encontrar lo siguiente: la aleación de aluminio es Al 514 y se demuestra a continuación.

De acuerdo al ASM Aluminum Alloy Casting la denominación acordada para aquellas aleaciones de aluminio que poseen magnesio inicia en 5 que corresponde al primer dígito (aleación principal), seguido de un par de dígitos más con una designación única sin más significado y culmina en un cuarto dígito que indica si es fundido (0) o lingote (1,2). Se tendrá entonces, “5xx.x, aluminio-magnesio”.

Tabla 16. ASM Aluminum Alloy Casting, de Composición Nominal y Límite de Aleaciones de Aluminio Fundido. (Basado en manuales industriales, la notable Aluminum Association Standards for Sand and Permanent Mold Castings y la Aluminum Association Registration Sheet for Alloys in the Form of Casting and Ingot)

Aleación	Tipo	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn
514.0	Nominal	...	...	...	...	4.0	...	...	...	...	...
	Límites	0.35	0.50	0.15	0.35	3.5-4.5	...	...	0.15	0.25	...

La Tabla 16 muestra que la aleación 514.0 posee únicamente magnesio en una composición nominal de 4.0 dentro de un mínimo de 3.5 y un máximo de 4.5 y se ha mostrado que de acuerdo al SEM realizado, se tiene un 3.19% de magnesio dentro del compuesto.

Otra razón para creerlo, es debido a su microestructura. En el ASM HandBook vol. 9, Metallography and Microstructures, Metallographic Techniques for Aluminum and its alloys, se tiene que en la Tabla 2 “ Fases constituyentes presentes en aleaciones de aluminio comerciales”, se despliegan una serie de compuestos encontrados dentro de las distintas aleaciones llamadas fases, que se deben encontrar en su microestructura:



A las que se llamarán A, B, C y D para facilitar su llamado. La fase C se identificará por medio de formas de partículas redondeadas y compactas así como granos contorneados. Para la fase B se podrán observar paralelogramos más o menos elongados y para la fase A se encuentran figuras abstractas llamadas ‘chinescas’.

Luego de un proceso de pulido con óxido de magnesia y glicerina, y bajo un microscopio, se encontraron las siguientes imágenes:

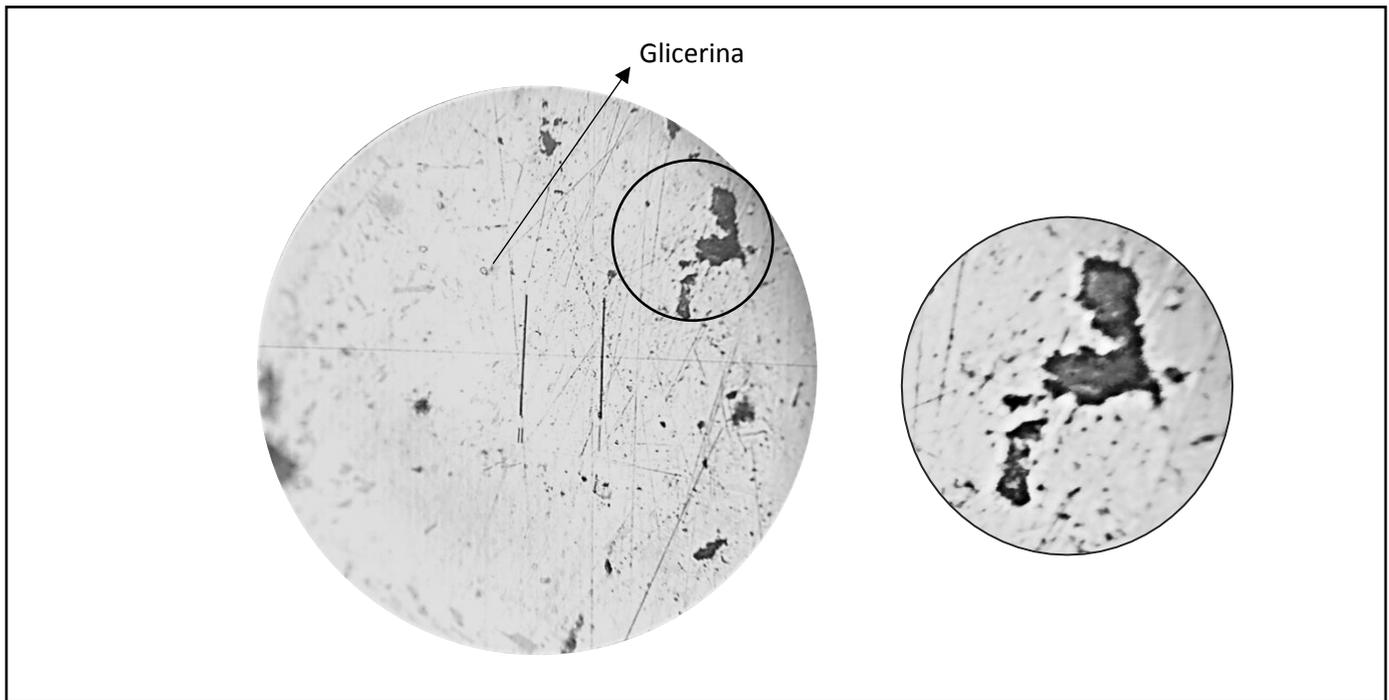


Figura 26. Imagen por microscopio de matriz de aluminio con aglomeraciones de nanotubos de carbono.

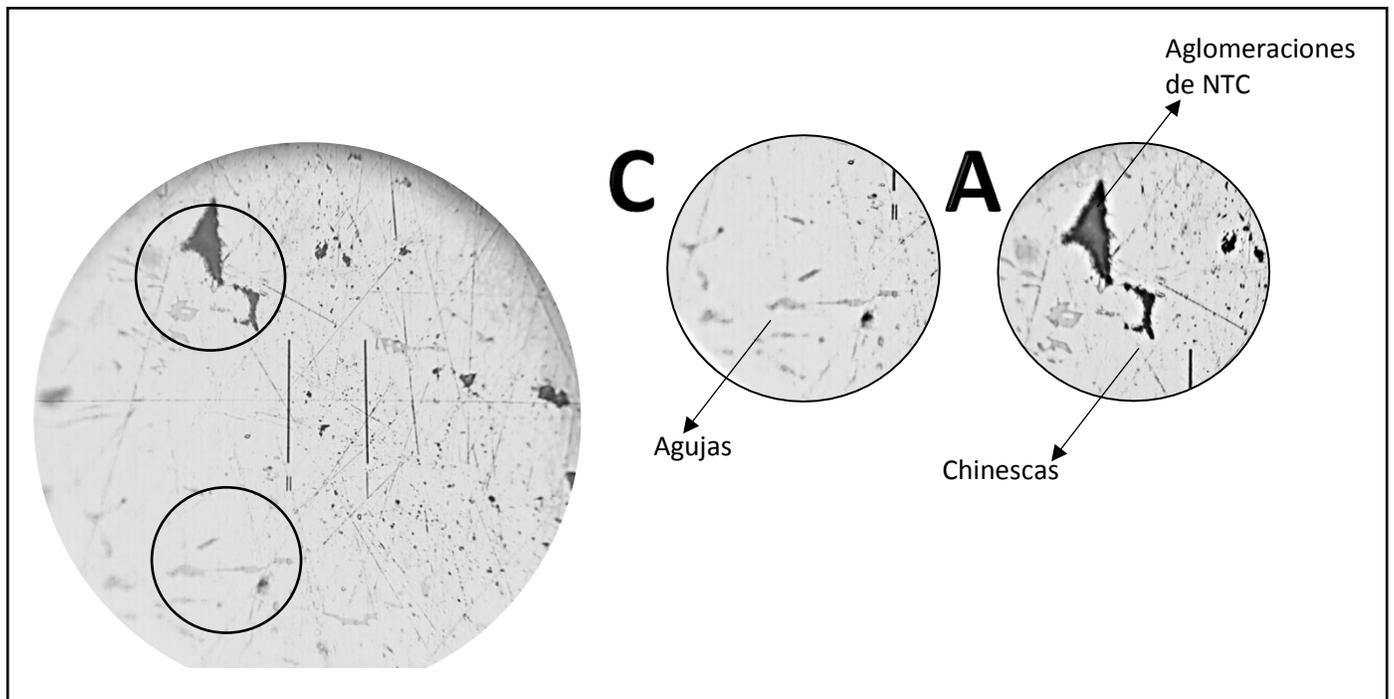


Figura 27. Imagen por microscopio de matriz de aluminio con aglomeraciones de nanotubos de carbón y fases A y C dentro de la microestructura.

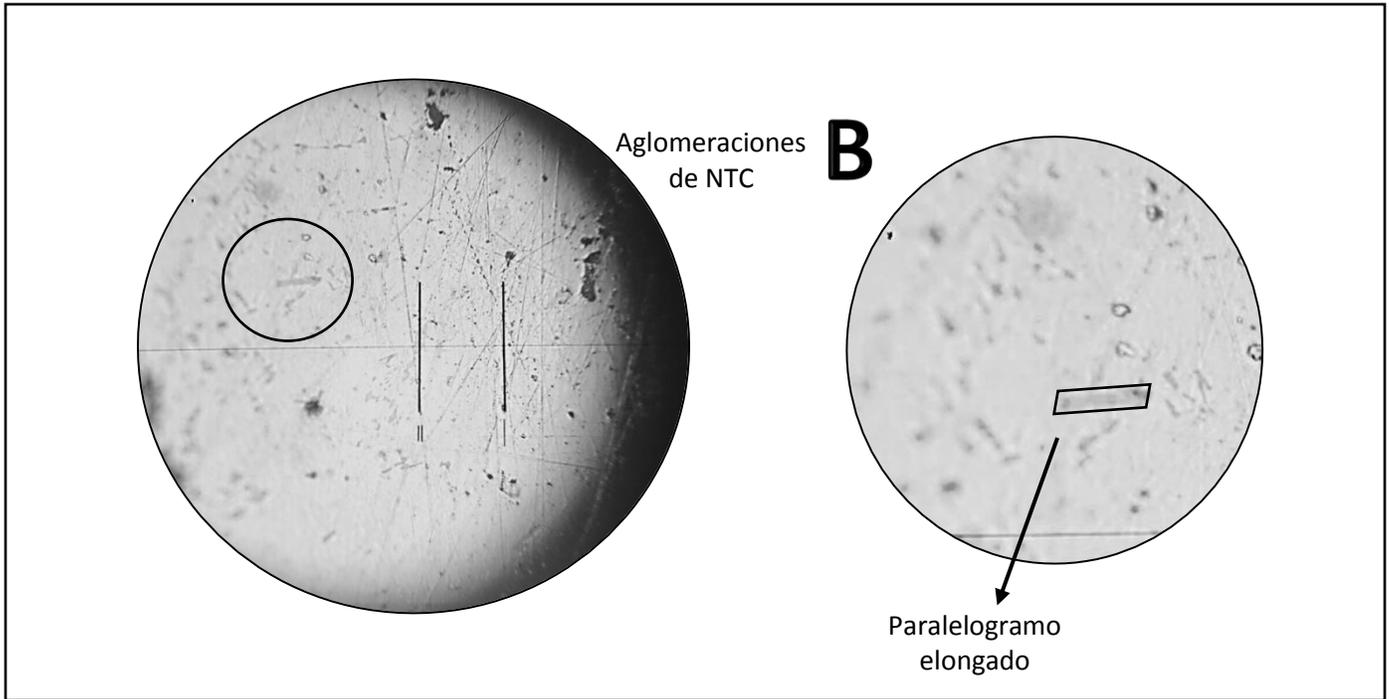


Figura 28. Imagen por microscopio de matriz de aluminio con aglomeraciones de nanotubos de carbón y fase B dentro de la microestructura.

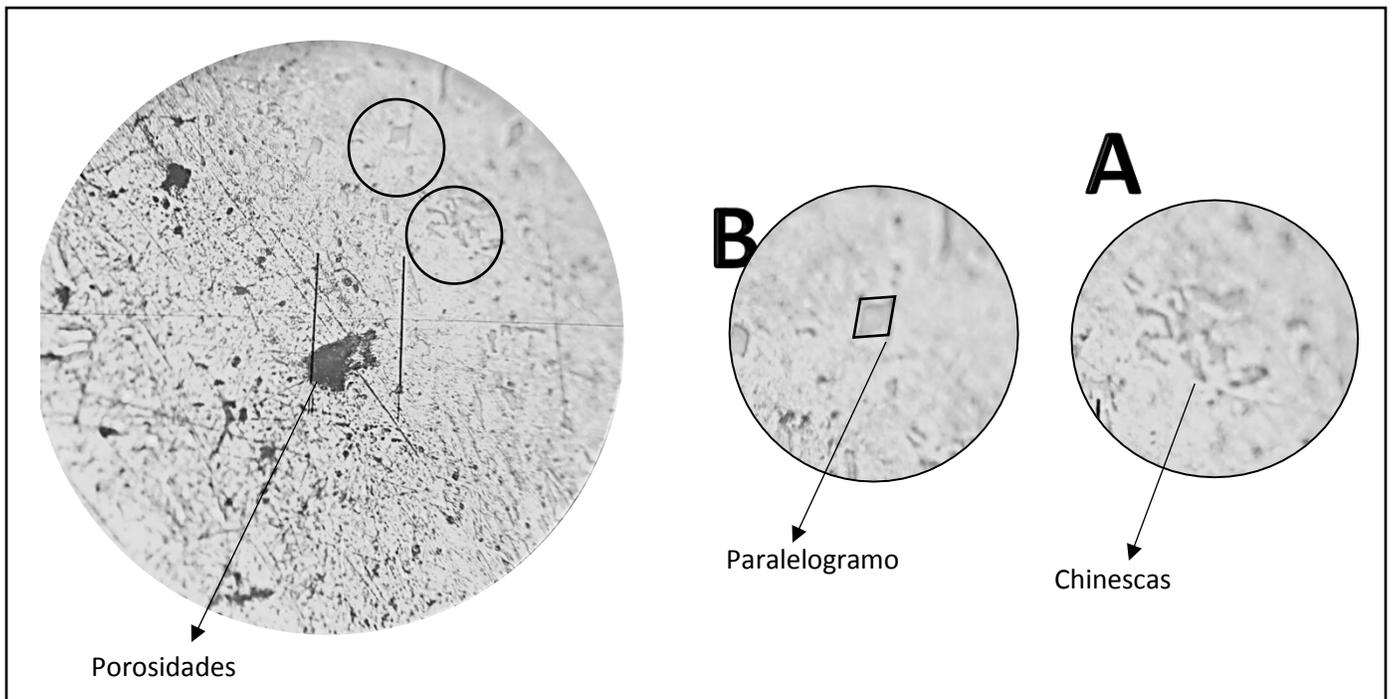


Figura 29. Imagen por microscopio de matriz de aluminio con porosidades y fase A y B dentro de la microestructura.

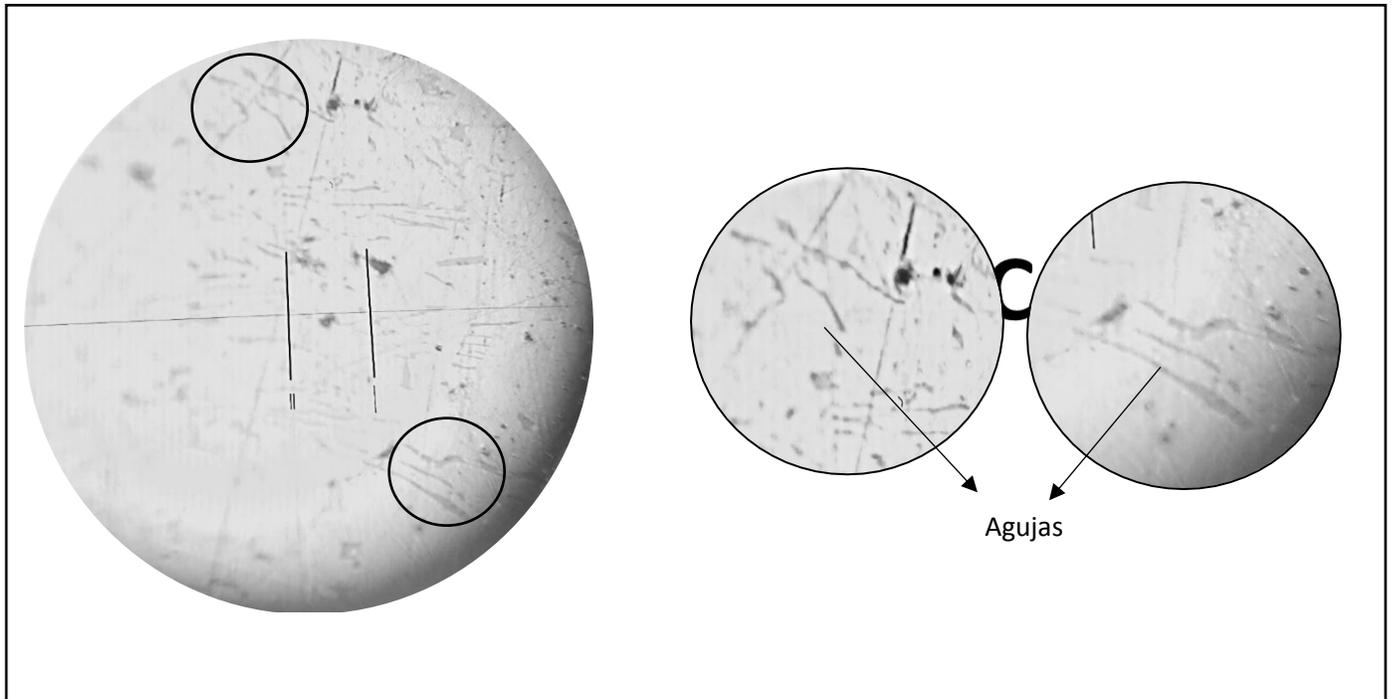


Figura 30. Imagen por microscopio de matriz de aluminio con fase C dentro de la microestructura.

Como se observa, las fases correspondientes a la aleación 514.0 se encuentran dentro de la matriz. De este modo se pueden analizar y predecir con mayor precisión las propiedades mecánicas como módulo de elasticidad, límite de fluencia y esfuerzo ultimo de acuerdo a los valores estándar de este tipo de aleación que surge a partir de las latas de aluminio que se reciclaron.

A continuación, se muestra una comparación de porosidades y nanotubos aglomerados dentro de la matriz de aluminio (Figura 32). La diferencia radica principalmente en el tamaño y en el color, pues las aglomeraciones de nanotubos de carbón son de un negro más intenso y no se observa efecto de profundidad como se hace con las porosidades y son figuras más grandes e irregulares.

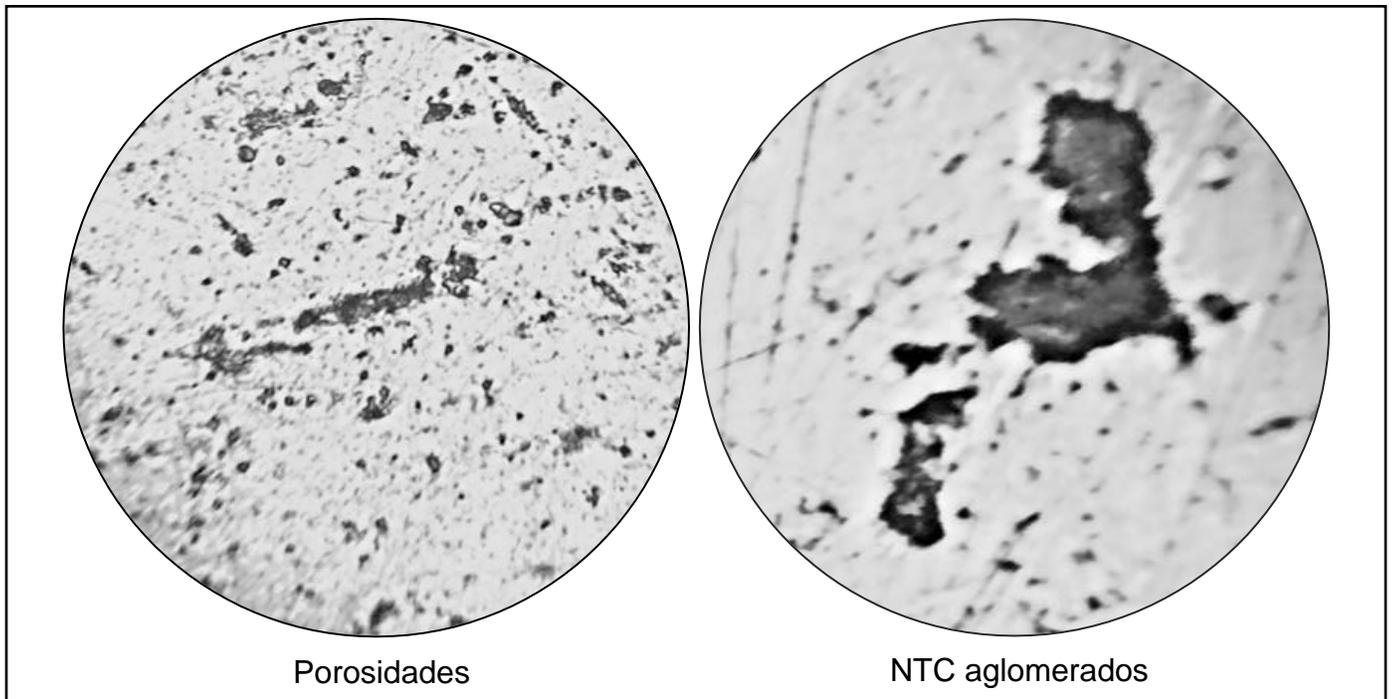


Figura 31. Diferencia visual entre porosidades y nanotubos de carbono aglomerados dentro de la matriz de aluminio.

En la literatura no hay registro oficial del valor del módulo de elasticidad para la aleación 514.0, sin embargo, se calculó a partir de la formula $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$., obteniendo un valor promedio de 40 GPa contra 70 GPa para casi cualquier otra aleación.

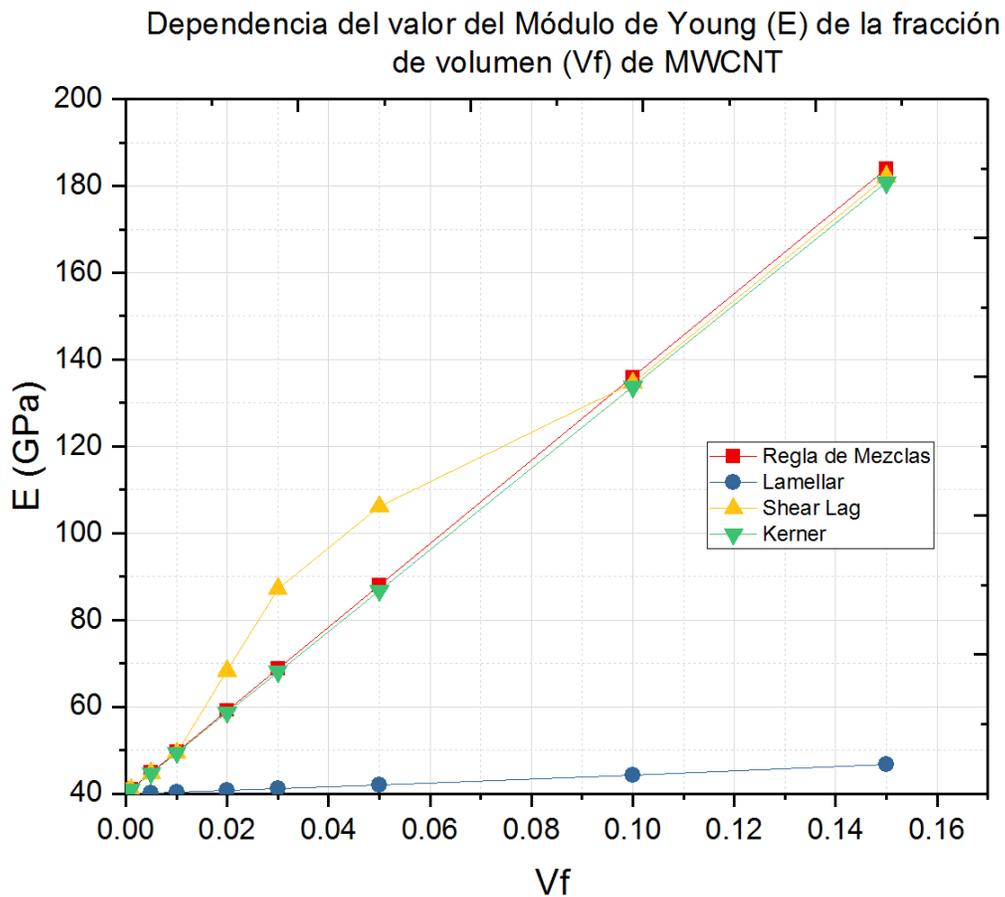


Figura 32. Predicción de valores del módulo de elasticidad del compuesto de acuerdo a la cantidad en volumen de nanotubos de carbono.

Los valores esperados para el módulo de elasticidad debieran estar entre la línea de Shear Lag (amarilla) y la de Lamellar (azul), es decir que para los porcentajes usados de 0.007% V de nanotubos de carbono no debiera ser mayor a 50 GPa, para 1.5% V 60 GPa y para 3.0% V no mayor a 70 GPa. Se sugiere también que si se empleara un porcentaje de 15% V el módulo podría llegar hasta los 180 GPa.

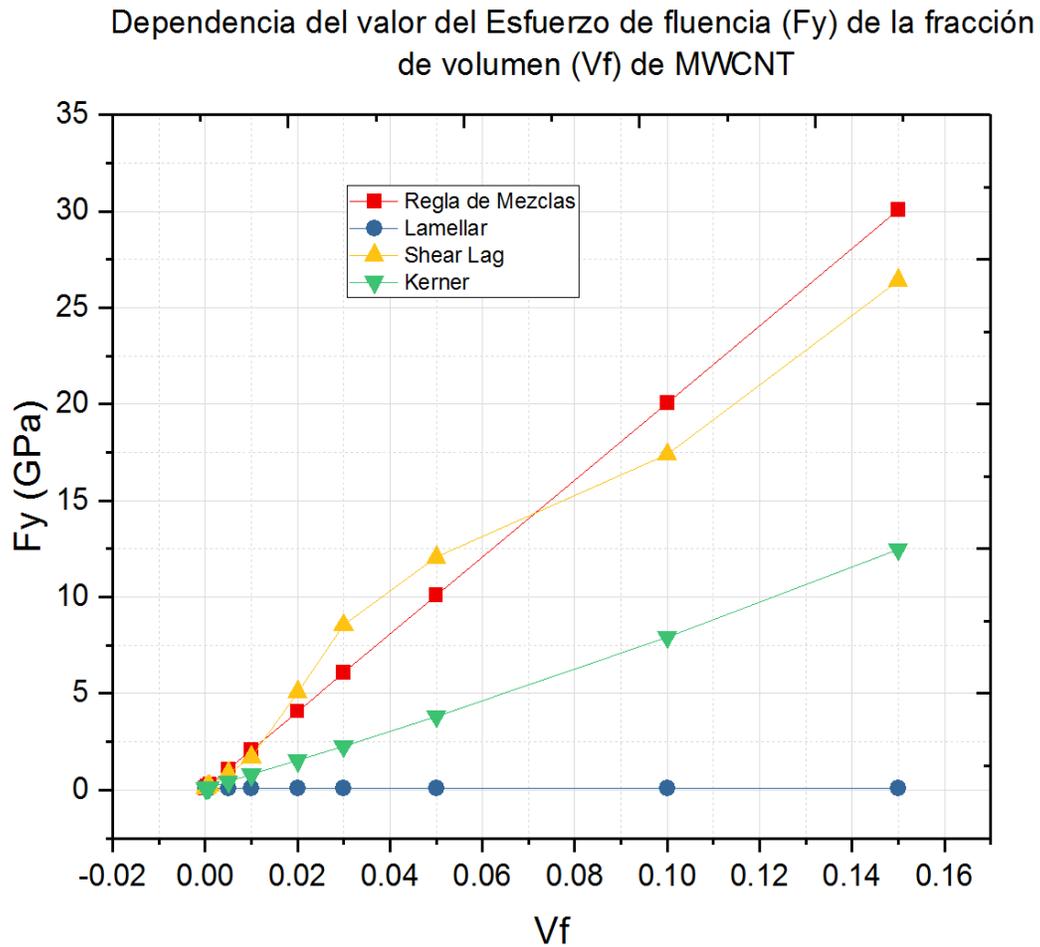


Figura 33. Predicción de valores del Esfuerzo de fluencia F_y del compuesto de acuerdo a la cantidad en volumen de nanotubos de carbono.

Por su lado, esta gráfica indica que el valor más alto esperado si se añadieran 16%V de nanotubos de carbono, el esfuerzo de fluencia F_y podría llegar, según la Regla de mezclas, que es siempre la más optimista, hasta los 30 GPa, contraponiéndose a Lamellar que dice que no superarían los 100 MPa. Lo cierto es que de acuerdo a la Tabla 10, el mayor aumento en el esfuerzo de fluencia comparado con el aluminio sin ninguna añadidura de nanotubos, fue de 6.40% con 0.007%V, dándole mayor mérito a la teoría de Kerner.

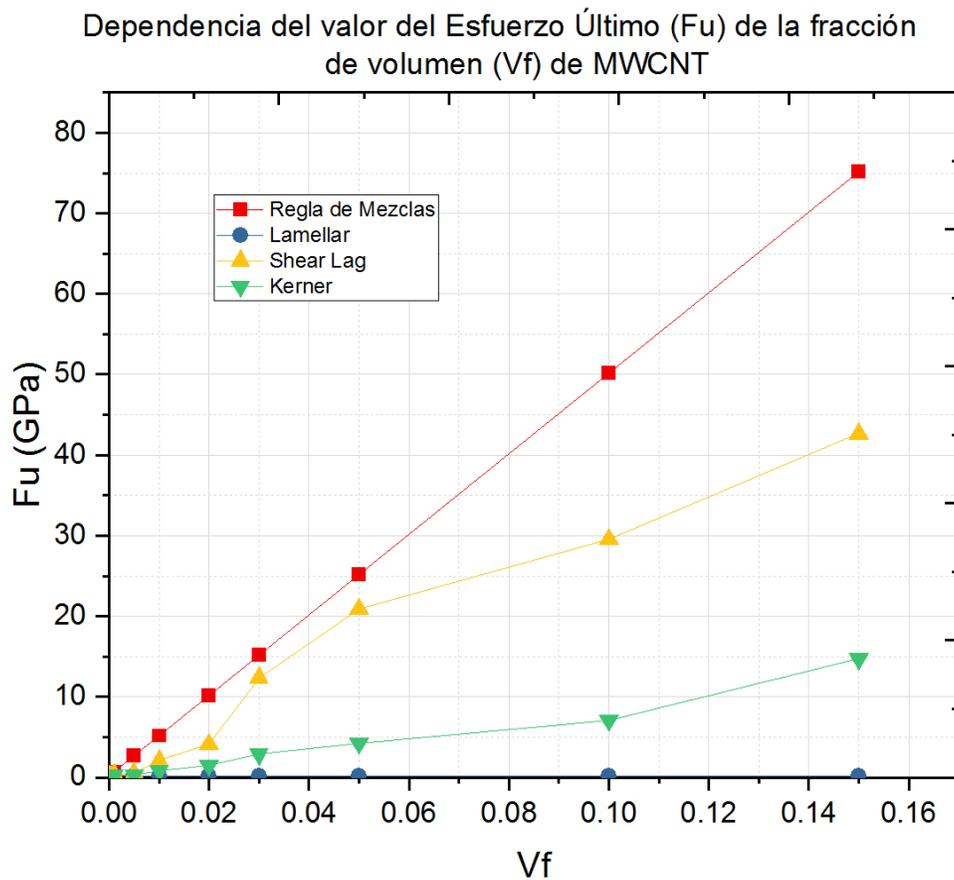


Figura 34. Predicción de valores del Esfuerzo ultimo F_u del compuesto de acuerdo a la cantidad en volumen de nanotubos de carbono.

Para el esfuerzo último, los cálculos indican que para 3.0% debía haber un esfuerzo máximo de 10 GPa y un mínimo de 180 MPa con la teoría de Lamellar. Experimentalmente el más acertado fue Lamellar, pues el aumento fue del 42%.

4.6 Prueba de Dureza de Vickers

Se puede suponer, basándose en los resultados de microdureza, que, en efecto, la añadidura de nanotubos de carbono incrementan ampliamente la resistencia de esfuerzo a la tensión, siendo la menor cantidad de ellos, la más conveniente (de 240 MPa a un aumento de 625 MPa con 0.0075% V de NTC). Sin embargo, en la Tabla 17, se muestran los resultados de las pruebas a tensión. La diferencia de valores en la tensión, se deben, muy probablemente al tipo de aleación de aluminio y al método de fundición y mezclado.

Tabla 17. Resultados obtenidos para pruebas de microdureza de Vickers y su equivalencia en esfuerzo a la tensión de acuerdo de tablas de conversión de para durezas.

Microdureza de Vickers y su equivalencia en esfuerzo a la tensión		
Carga	0.2	kgf
Tiempo	15	s
(%) de NTC	HV	MPa
0.00	75.7	240
0.0075	194.8	625
1.50	84.08	270
3.00	87.48	280

4.7 Módulo Elástico y Límites de Fluencia

Luego de su fundición y mezclado con la proporción indicada de nanotubos de carbono, el compuesto se tornea y se le da la forma adecuada para poder ser sometido al ensayo de tensión. Es sumamente importante que las dimensiones sean exactas y que el torno sea de calidad, de lo contrario la prueba no se puede realizar apropiadamente y los resultados no

serán del todo confiables. La Fig. 31 muestra el proceso de ruptura de las probetas sometidas a tensión.

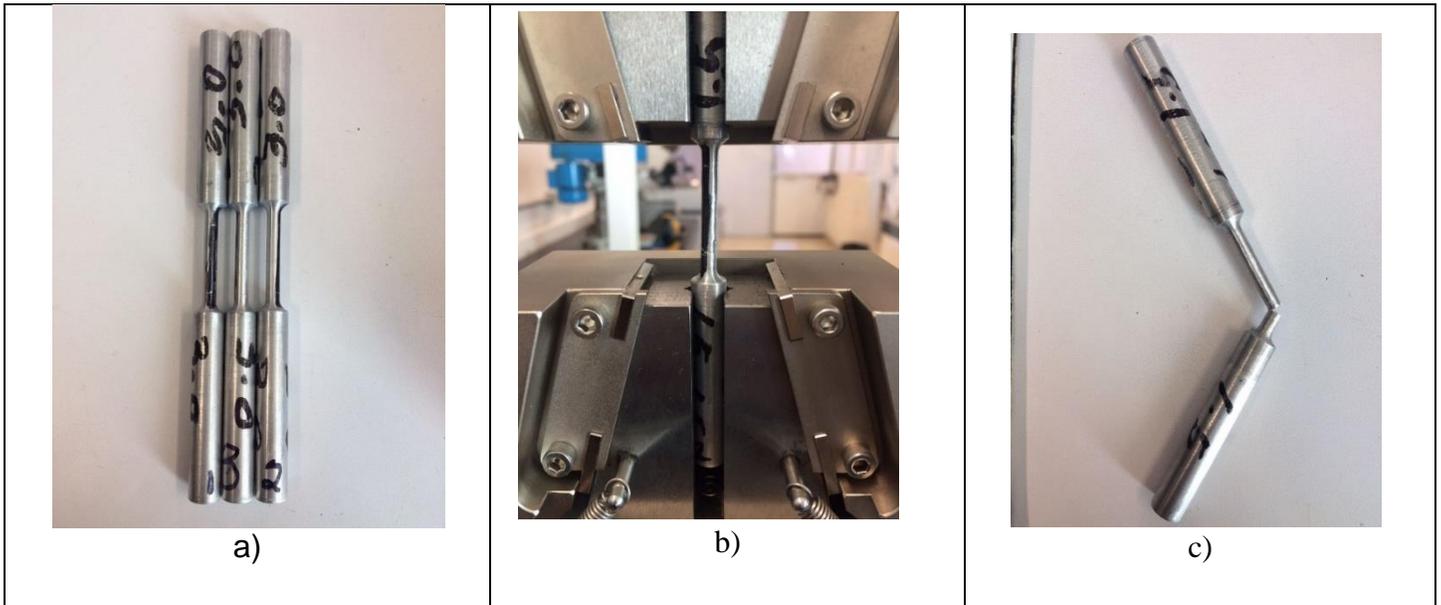


Figura 35. a) Ejemplo de probetas para tensión hechas de aluminio reciclado con nanotubos de carbón, fundido y moldeado en arena, torneado de acuerdo a las dimensiones ante señaladas. b) Probeta en máquina universal sometida a tensión y a quiebre, c) Ruptura en probeta después de ser sometida a tensión.

Por otro lado, las probetas para compresión fueron de 13 x 38 mm, como se muestra a continuación:

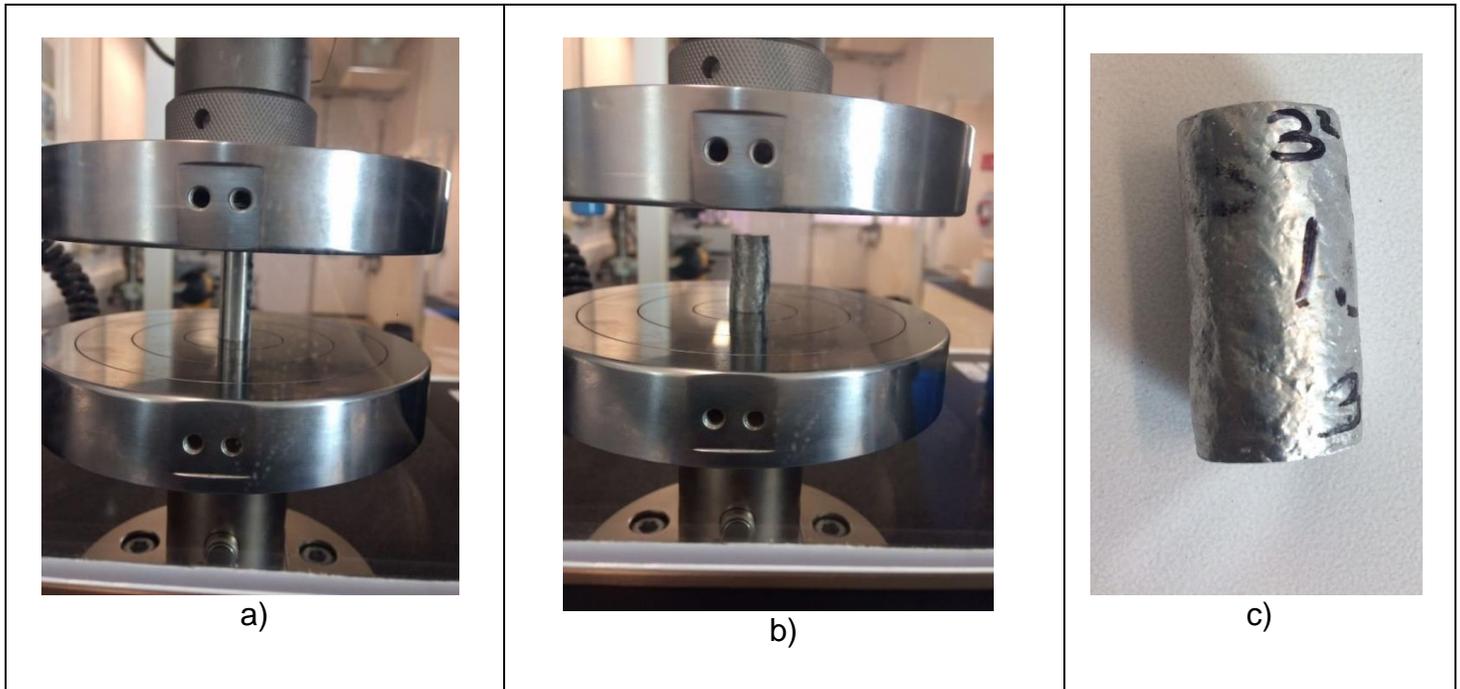


Figura 36. a) Probeta de compresión montada en máquina antes de aplicación de carga. b) probeta después de aplicación de carga. c) probeta deformada luego de ser sometida a carga de compresión.

Para cada una de las diferentes concentraciones de nanotubos de carbón (0%, 0.007%, 1.5% y 3.0% en volumen) se realizó un ensayo de tensión y compresión en tres probetas por cada porcentaje para cada ensayo. Los resultados se muestran gráficamente de la siguiente manera:

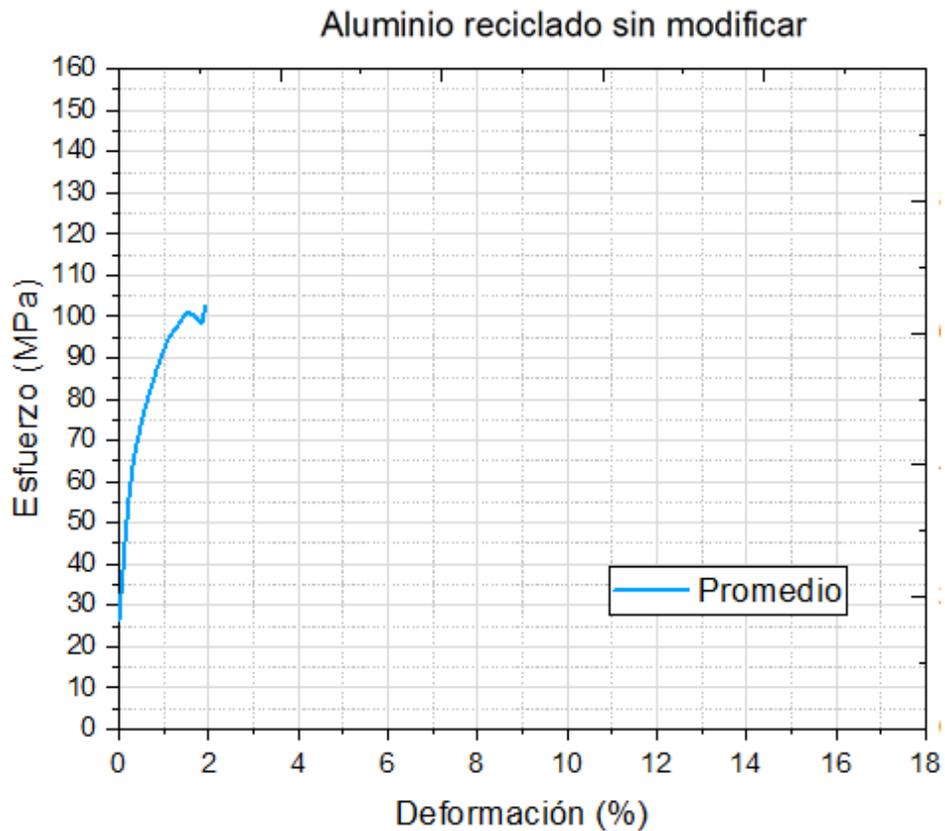


Figura 37. Curva esfuerzo-deformación para probetas de aluminio reciclado sin nanotubos de carbono en prueba de tensión

Se realizaron 4 pruebas en este caso para tener un mayor control de los cambios y diferencias obtenidas del compuesto a distintas concentraciones de nanotubos. Como se puede observar, los valores de resistencia última varían en cada caso teniendo un caso máximo de casi 120 MPa y un mínimo de poco más de 100 MPa, estando los dos restantes en valores medios dentro de este máximo y mínimo.

La variación entre estos resultados puede deberse principalmente al tipo de fundición ya que se obtienen porosidades y granos muy gruesos que afectan la ductilidad del material. Esto sucede debido a que la solidificación se realiza a temperatura ambiente y no se acelera el proceso lo cual reduciría considerablemente el tamaño de los granos.

Al solidificarse a temperatura ambiente obtiene un tamaño que no permite abiertamente la mejor combinación de esfuerzo y ductilidad maximizando el área superficial de la frontera de los granos (Kaufman & Rooy, 2004) . Sin embargo, para el tipo de aleación de aluminio obtenida, los resultados no se encuentran tan alejados de los estandarizados de 170 MPa.

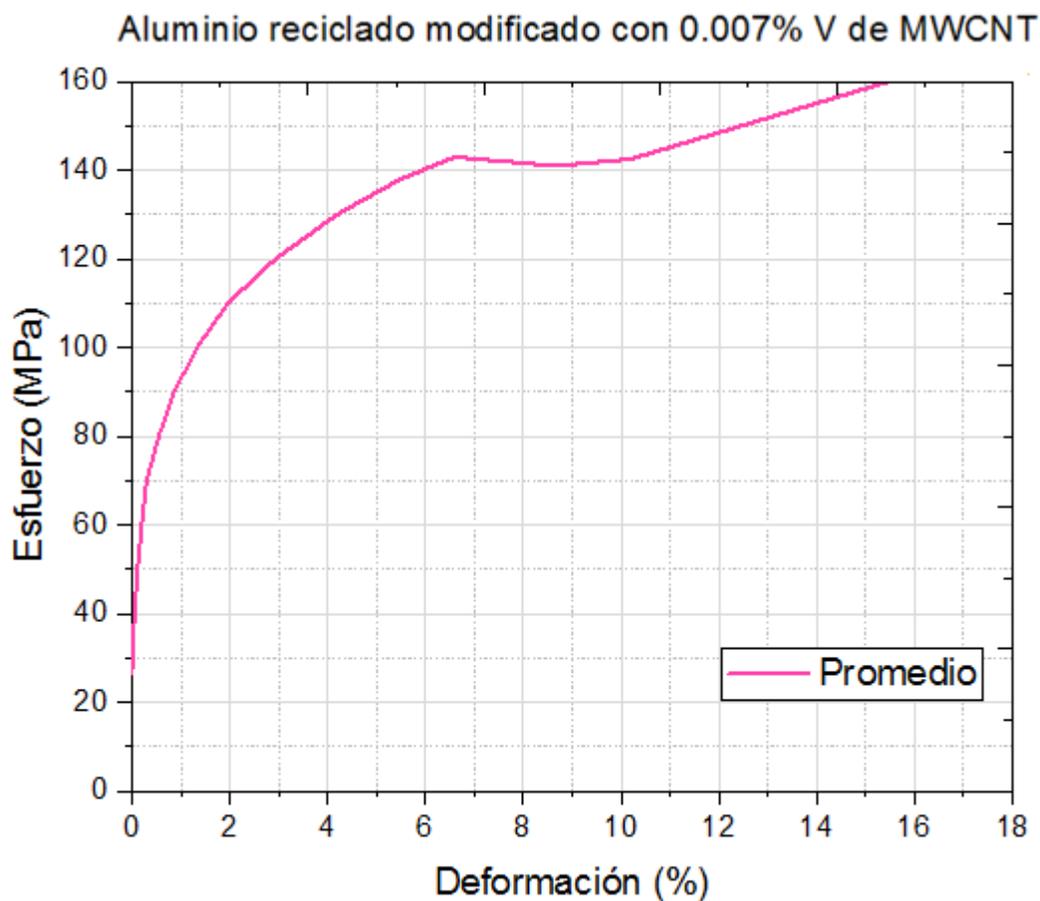


Figura 38. Curva esfuerzo-deformación para probetas de aluminio reciclado modificado con 0.007% V de nanotubos de carbono de paredes múltiples en prueba de tensión.

Es notorio, que para el menor de los porcentajes se encuentra uno de los mejores resultados de todos los ensayos realizados correspondiente a la probeta no. 2, con un esfuerzo último de casi 170 MPa a una deformación de 14.5%.

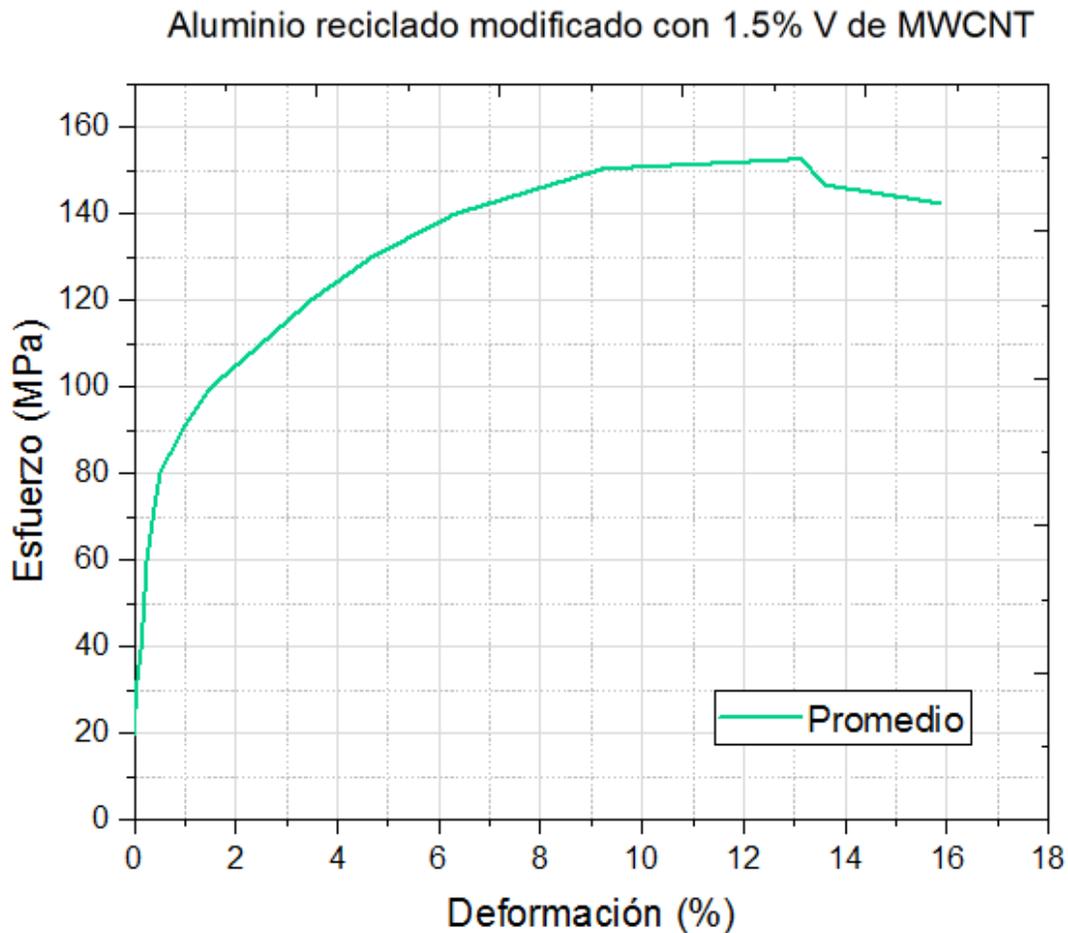


Figura 39. Curva esfuerzo-deformación para probetas de aluminio reciclado modificado con 1.5% V de nanotubos de carbono de paredes múltiples en prueba de tensión.

Para este porcentaje se pueden notar similitudes entre los tres ensayos variando únicamente de 150 MPa a casi 160 MPa en cuanto a esfuerzo, pues en deformación existe una mayor variación de 9.5% a 15%.

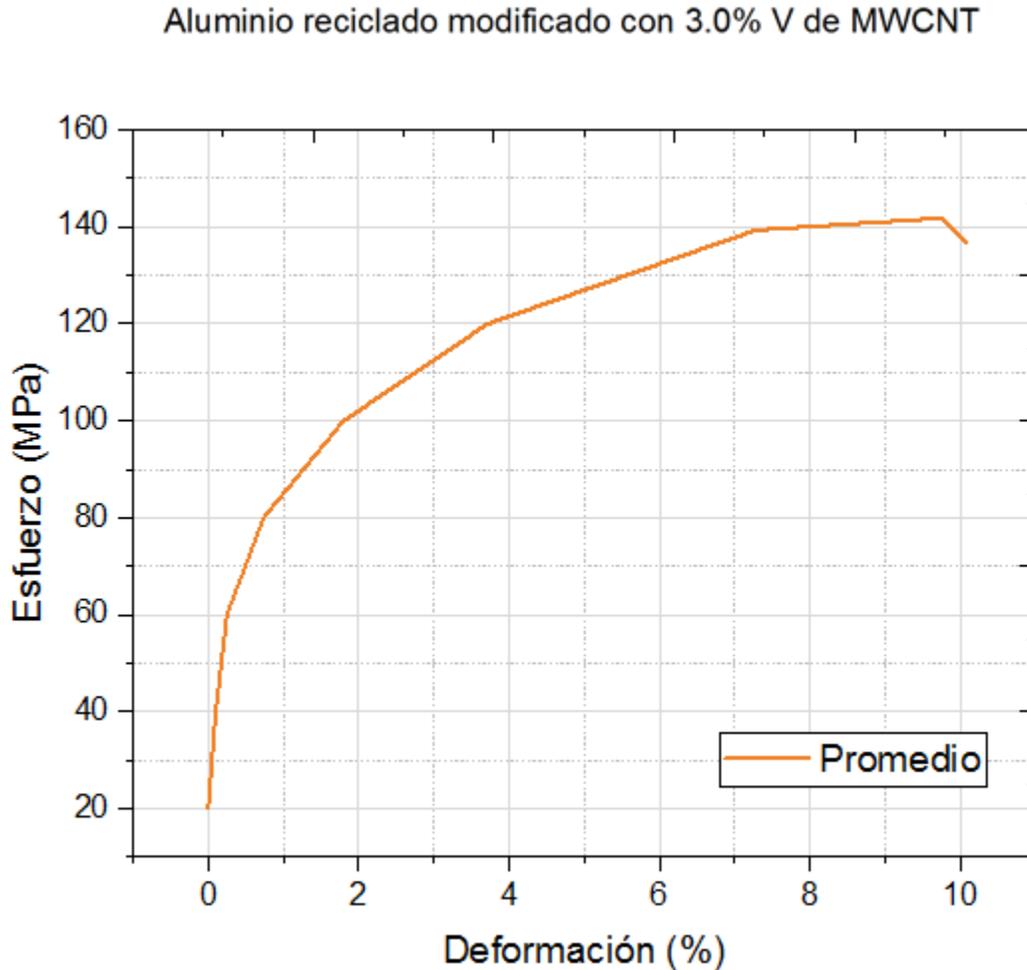


Figura 40. Curva esfuerzo-deformación para probetas de aluminio reciclado modificado con 3.0% V de nanotubos de carbono de paredes múltiples en prueba de tensión.

En las tablas que se muestran a continuación (Tablas 6-10) se muestran los valores numéricos de cada ensayo. Se pueden identificar los aumentos en las medias del esfuerzo máximo de tracción conforme aumenta el porcentaje de los nanotubos hasta llegar al 3.0% V donde disminuye notablemente. No así en el módulo de elasticidad el cual continúa aumentando en cada concentración.

Tabla 18. Propiedades mecánicas para aluminio reciclado sin ningún porcentaje de nanotubos de carbono obtenidos en ensaye de tensión.

0.00%V MWCNT						
	Máximo Esfuerzo de tracción	Deformación por tracción	Esfuerzo de fluencia (0.2%)	Módulo de Young E	Módulo de Poisson v	Módulo de Cortante G
	Mpa	%	Mpa	Mpa		Mpa
1	102.88	1.90	76.22	13400.69	0.35	4970.60
2	102.98	1.33	81.63	21962.71	0.35	8145.32
3	117.33	2.63	81.94	23400.76	0.36	8603.22
4	111.62	2.80	57.25	18887.29	0.36	6933.74
Media	108.70	2.17	74.26	19412.86	0.35	7163.22
Desv. Est.	7.06	0.68	11.64	4428.22	0.01	1622.59
Co. de Var.	6.50	31.41	15.67	22.81	2.11	22.65

Como se mencionó anteriormente, si se compara estos resultados experimentales del aluminio reciclado a partir de latas de bebidas, con el aluminio tradicional 6061 se tienen valores totalmente inconciliables debido a la gran diferencia entre ellos tanto para esfuerzo de fluencia, esfuerzo último y módulo de elasticidad. Pero al compararse con la aleación de aluminio con la que se está tratando realmente se puede empezar un análisis adecuado

El porcentaje de 0.007% V, a pesar de ser el de menor cantidad, proporciona una de las mejores caras en los valores numéricos. En este porcentaje se encuentran el esfuerzo de fluencia más alto y el segundo esfuerzo máximo más grande. No obstante, se puede ver el menor módulo de elasticidad con 20.7 GPa.

Tabla 19. Propiedades mecánicas para aluminio reciclado con 0.007%V de nanotubos de carbono de paredes múltiples obtenidos en ensayo de tensión.

0.007%V MWCNT						
	Máximo Esfuerzo de tracción	Deformación por tracción	Esfuerzo de fluencia (0.2%)	Módulo de Young E	Módulo de Poisson v	Módulo de Cortante G
	Mpa	%	Mpa	Mpa		Mpa
1	127.84	4.83	72.42	18085.45	0.35	6708.28
2	167.88	14..61	82.92	25833.19	0.35	9580.77
3	143.44	5.56	81.67	18175.40	0.36	6672.39
Media	146.39	5.20	79.00	20698.01	0.35	7653.81
Desv. Est.	20.18	0.52	5.74	4447.42	0.01	1668.89
Co. de Var.	13.79	9.94	7.26	21.49	2.28	21.80

Para 1.5% V se pueden encontrar los valores más altos de esfuerzo máximo con una media de 154.82 MPa.

Esto permitiría indicar que esta concentración de nanotubos atribuye una mejor cualidad de soportar mayor esfuerzo a la tracción si se buscara esta característica en específico. Se señala también que es el caso con menor variación de valores entre ensayos, lo cual podría deberse a que hubo una mejor distribución de los nanotubos dentro de la matriz del aluminio o una mejor solidificación de los granos o menor cantidad de poros los cuales provocan brinco en los valores ocasionados por los vacíos al momento de producirse la tensión y por lo tanto la deformación.

Tabla 20. Propiedades mecánicas para aluminio reciclado con 1.5%V de nanotubos de carbono de paredes múltiples obtenidos en ensaye de tensión.

1.5%V MWCNT						
	Máximo Esfuerzo de tracción	Deformación por tracción	Esfuerzo de fluencia (0.2%)	Módulo de Young E	Módulo de Poisson v	Módulo de Cortante G
	Mpa	%	Mpa	Mpa		Mpa
1	158.19	15.30	74.19	18967.72	0.34	7077.51
2	151.45	9.72	73.97	23310.02	0.33	8763.17
3	155.32	13.10	73.99	20851.41	0.34	7780.38
Media	154.99	12.71	74.05	21043.05	0.34	7873.68
Desv. Est.	4.77	3.95	0.16	3070.47	0.01	1191.94
Co. de Var.	3.08	31.05	0.21	14.59	2.10	15.14

Para el mayor de los porcentajes en volumen, 3.0% se encuentra con el menor valor para el esfuerzo de fluencia, el segundo en la escala ascendente para el esfuerzo máximo y el valor más alto de los ensayos realizados para el módulo de elasticidad. Si se buscara incrementar esta última propiedad, a primera vista se podría considerar la proporción adecuada para esto.

Tabla 21. Propiedades mecánicas para aluminio reciclado con 3.0%V de nanotubos de carbono de paredes múltiples obtenidos en ensaye de tensión.

3.0%V MWCNT						
	Máximo Esfuerzo de tracción	Deformación por tracción	Esfuerzo de fluencia (0.2%)	Módulo de Young E	Módulo de Poisson v	Módulo de Cortante G
	Mpa	%	Mpa	Mpa		Mpa
1	155.46	15.60	67.36	22316.05	0.34	8326.88
2	140.18	6.78	72.59	23975.68	0.35	8891.87
3	137.77	6.57	70.55	24359.42	0.34	9089.34
Media	144.47	9.65	70.17	23550.38	0.34	8769.36
Desv. Est.	9.59	5.15	2.64	1086.05	0.00	395.71
Co. de Var.	6.64	53.41	3.76	4.61	1.38	4.51

En la Tabla 10 hay un concentrado de los valores medios obtenidos en las tablas anteriores para una mejor apreciación, así como la adecuada comparación con los valores numéricos de las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 514.

Nuevamente se debe recordar que los resultados deben analizarse de dos maneras: la primera es considerando que el procedimiento que se realizó en este trabajo de investigación fue un proceso rudimentario, es decir con los medios más accesibles, previo a utilizar equipos más costosos donde los consumibles son notablemente más altos.

Lo anterior que se traduce en una fundición pobre que ocasiona un ambiente deficiente microestructuralmente hablando por lo que no se trata de conciliar los resultados experimentales con los estandarizados, si no de tomar en cuenta las condiciones de diseño del compuesto para dejar de lado las diferencias entre valores numéricos y tomar en cuenta los incrementos obtenidos con cada distinta concentración de nanotubos de carbono dentro de la matriz de aluminio.

Si estos resultados fuesen reproducibles se encontrará que debido a la sencillez de la elaboración del compuesto, buscando siempre el menor uso de energía posible, el costo de producción y la huella de carbono emitida serán mínimos y sin mayor complicación.

La segunda manera de analizar estos resultados es entonces, tomando la idea de que las propiedades mecánicas son menores a las esperadas pero que con la adición de los nanotubos se podría llegar a una equivalencia si se quisiera trabajar con un proceso similar al de diseño para un fin específico, es decir que se requiriera una fundición taller de latas de aluminio en horno de crisol y en molde de arena, específicamente.

Tabla 22. Valores promedio de propiedades mecánicas obtenidos en ensaye a tensión de distintos porcentajes de ntc en probetas de aluminio reciclado.

	Máximo Esfuerzo de tracción	Deformación por tracción	Esfuerzo de fluencia (0.2%)	Módulo de Young E	Módulo de Poisson v	Módulo de Cortante G
	Mpa	%	Mpa	Mpa	-	Mpa
Al 514	172.36	9	82.74	366787.4*	0.33	137890
0.00%	108.70	2.17	74.26	19412.86	0.35	7163.22
0.01%	146.39	5.20	79.00	20698.01	0.35	7653.81
1.50%	154.82	12.51	74.08	21138.87	0.34	7920.34
3.00%	144.47	9.65	70.17	23550.38	0.34	8769.36

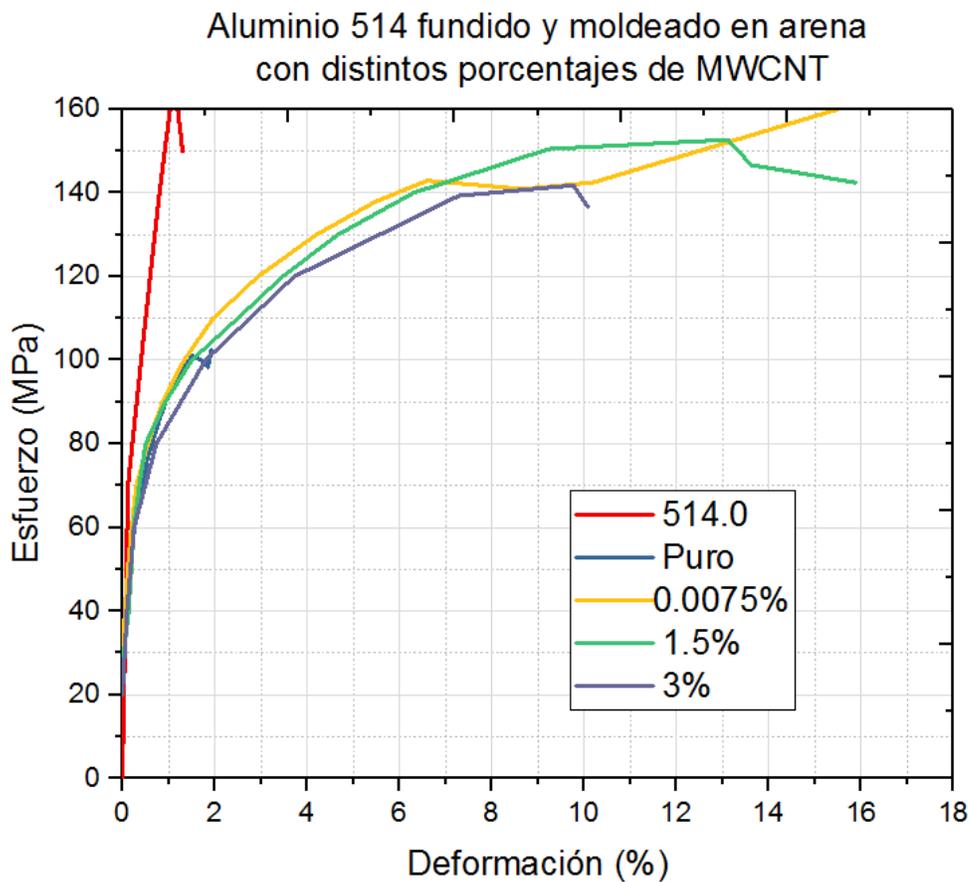


Figura41. Curvas esfuerzo-deformación de todos los ensayos a tracción ejecutados.

Teniendo como punto de comparación y superación al aluminio sin modificar (0.00% V) se puede decir entonces que los aumentos quedan de la siguiente forma:

. Tabla 23. Porcentaje de criterios de aumento en los valores de propiedades mecánicas según porcentaje de ntc.

	Máximo Esfuerzo de tracción	Esfuerzo de fluencia (0.2%)	Módulo de Young E	Módulo de Cortante G
	%	%	%	%
0.007%	34.67	6.39	6.62	6.85
1.50%	42.58	-0.28	8.40	9.92
3.00%	32.90	-5.51	21.31	22.42

Siendo entonces, el menor de los porcentajes el único cuyos aumentan siempre, seguido de 1.5% con una disminución mínima en el esfuerzo de fluencia y un muy buen aumento del esfuerzo último a tensión de 42.58%.

Para el 3.0% se tiene un aumento de casi 33% en el esfuerzo último, el mayor aumento en el módulo de elasticidad de más de 20% pero una disminución mayor al 5% en la fluencia.

A continuación, se observan los ensayos a compresión realizados en las probetas con porcentaje de 1.5% V y 3.0% V. (Figuras 32 y 33).

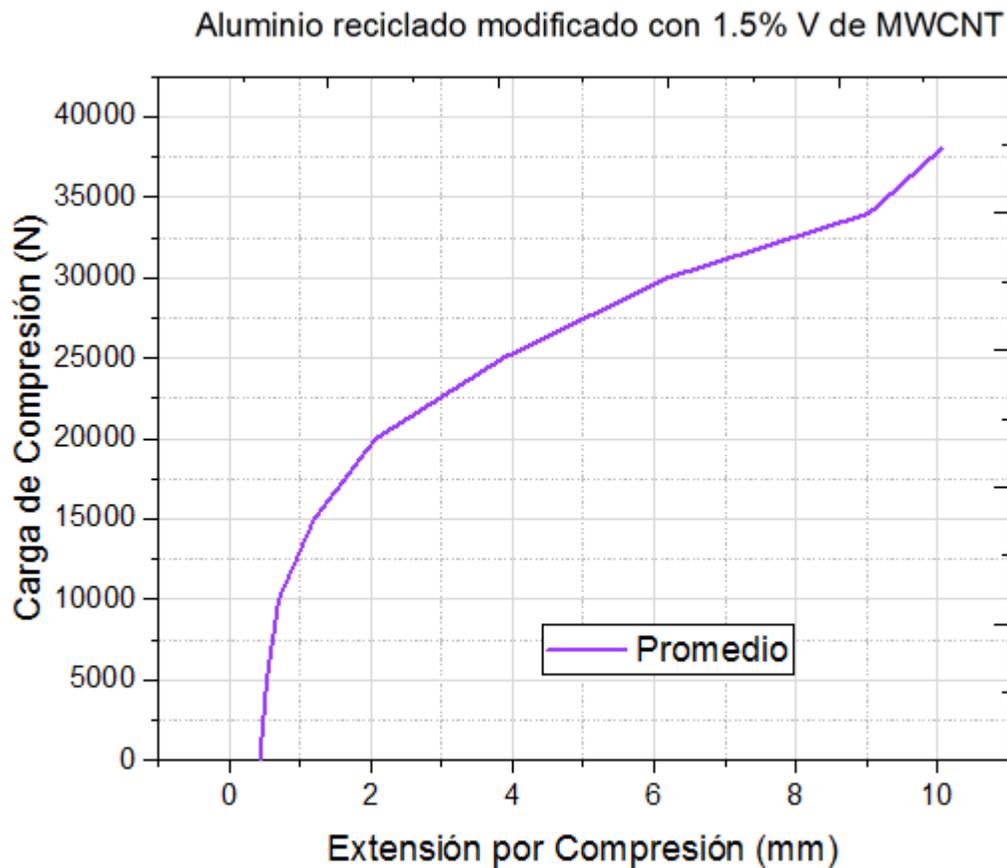


Figura42. Ensaye a compresión para aluminio reciclado modificado con 1.5% V de nanotubos de carbono.

Los resultados lanzaron valores muy similares entre sí, alrededor de los 286.90 MPa para esfuerzo máximo de compresión y 15 GPa para el módulo de Young. Aumentando únicamente 0.26 Mpa en el esfuerzo y reduciéndose cerca de 800 Mpa en el módulo de elasticidad cuando la cantidad de nanotubos sube a 3.0%.

Tabla 24. Valores obtenidos en prueba de compresión para 1.5%V de nanotubos de carbono en matriz de aluminio reciclado.

1.5%V MWCNT

	Máximo Esfuerzo de compresión	Deformación por esfuerzo de compresión	Módulo de Young E
	Mpa	%	Mpa
1	293.86	26.37	15273.10
2	289.39	26.39	15569.56
3	277.44	26.37	14942.57
Media	286.90	26.38	15261.74
Desv. Est.	8.49	0.01	313.65
Co. de Var.	2.96	0.04	2.06

Se vuelven a observar valores altamente iguales para las tres probetas ensayadas a compresión con 3% en volumen de nanotubos de carbono (Figura 44 y Tabla 23).

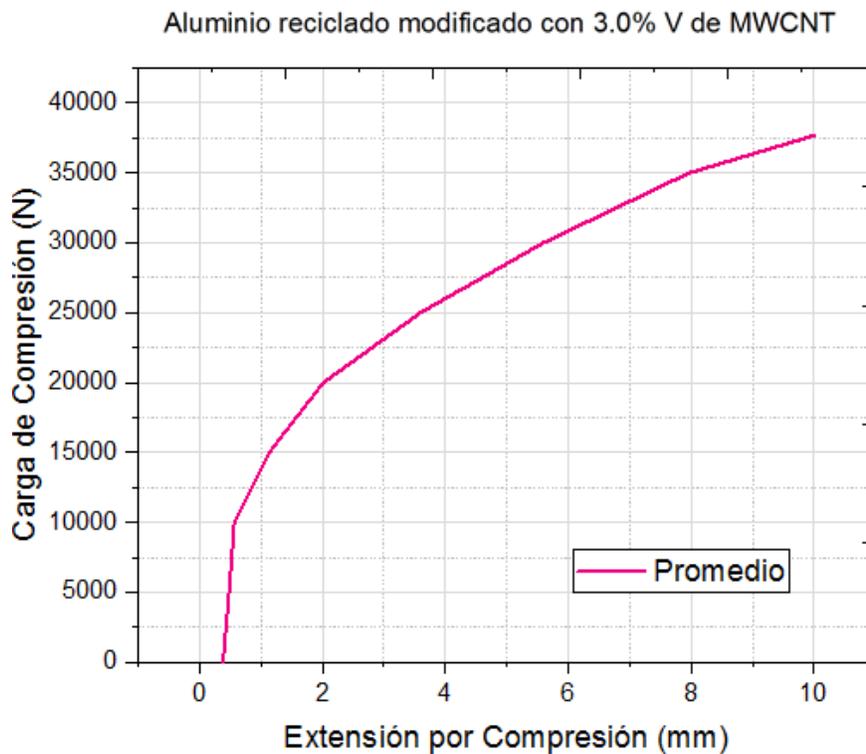


Figura 43. Ensayo a compresión para aluminio reciclado modificado con 3.0% V de nanotubos de carbono.

Tabla 25. Valores obtenidos en prueba de compresión para 3.0%V de nanotubos de carbono en matriz de aluminio reciclado.

3.0%V MWCNT			
	Máximo Esfuerzo de compresión	Deformación por esfuerzo de compresión	Módulo de Young E
	Mpa	%	Mpa
1	289.73	26.41	13846.89
2	280.74	26.41	14443.81
3	291.02	26.42	14942.27
Media	287.16	26.41	14410.99
Desv. Est.	5.60	0.01	548.43
Co. de Var.	1.95	0.02	3.81

Los esfuerzos axiales aplicados a una matriz de aluminio fundido y moldeado en arena se ve directamente afectada por la porosidad existente y por el tamaño de grano de las partículas solidificadas.

Además se debe recordar que los nanotubos de carbono si bien se ha demostrado que aumenta los valores de las propiedades mecánicas en distintos casos, tiende a aglomerarse provocando en muchos casos un efecto vacío pues se encuentran rodeados de si mismos y pierden interacción con la matriz y las partículas de aluminio perdiendo también la fuerza provocada por los enlaces entre nanotubo-aluminio.

De nuevo resulta importante señalar que no solo estamos tratando con una aleación de aluminio de propiedades mecánicas bajas sino que además con uno de los procesos de menor calidad del manejo del aluminio fundido que es el moldeo en arena ya que se tienen muchas variables de control como la humedad, permeabilidad, porcentaje de finos, temperatura del molde, temperatura ambiental, etc. pues cualquier variación afecta el resultado final.

Este proceso, comparado con otros como el forjado, el extruido, el soldado, etc. Donde el desempeño mecánico resultante del material es de mucho mayor, resulta de una calidad baja y de valores mínimos.

4.8 Análisis de Comportamiento Estructural

A continuación, se presentan dos análisis realizados con el programa SAP2000 donde se muestran los esfuerzos en los elementos empleados (trabes, columnas, armaduras) así como sus desplazamientos al ser sometidos a cargas cotidianas vivas y muertas. El cálculo detallado de las cargas no se muestra ya que la intención es ilustrar el comportamiento del material compuesto de estudio bajo dos criterios diferentes.

4.8.1 Marco

En este caso se analizó un marco de secciones I Columnas sección I6x4.03, trabes en dirección Y sección I 3x2.03 y trabes dirección X sección I4x2.31 con carga muerta puntual en cada nodo de 500 kg y viva de 200 kg. La intención es meramente ilustrativa para mostrar los esfuerzos y desplazamientos de los elementos ante tal tipo de cargas. La combinación para el análisis de carga elegido ha sido el más sencillo con un factor de 1.2 para carga muerta y 1.6 para carga viva.

Las propiedades mecánicas designadas a este marco son las mismas que se obtuvieron experimentalmente en esta investigación.

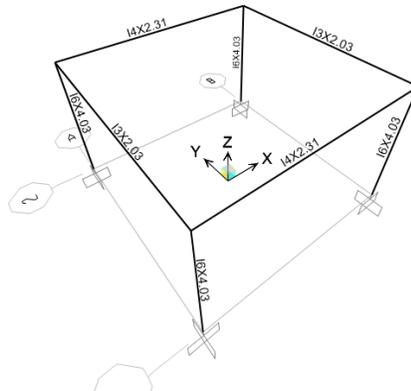
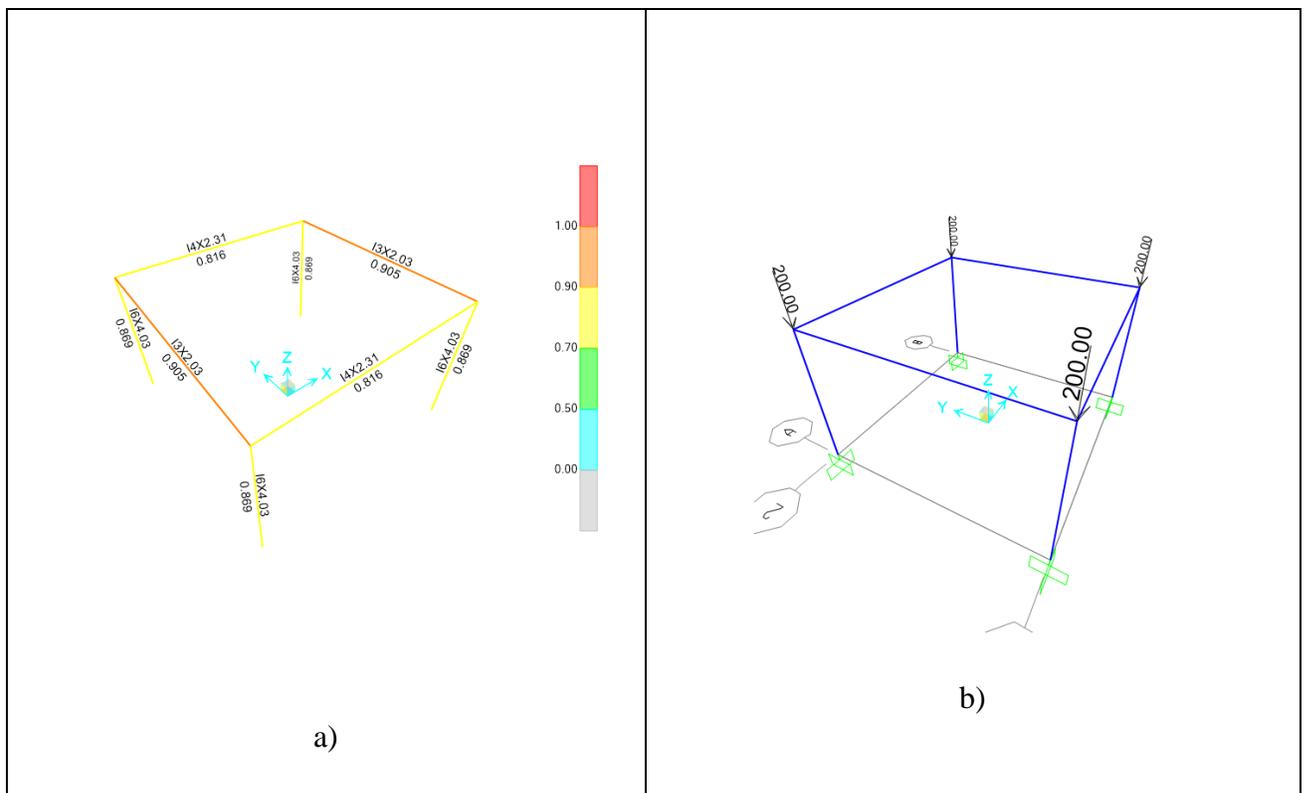


Figura 44. Análisis de esfuerzos en SAP2000 para un marco de aluminio reciclado con 1.5% nanotubos de carbono.



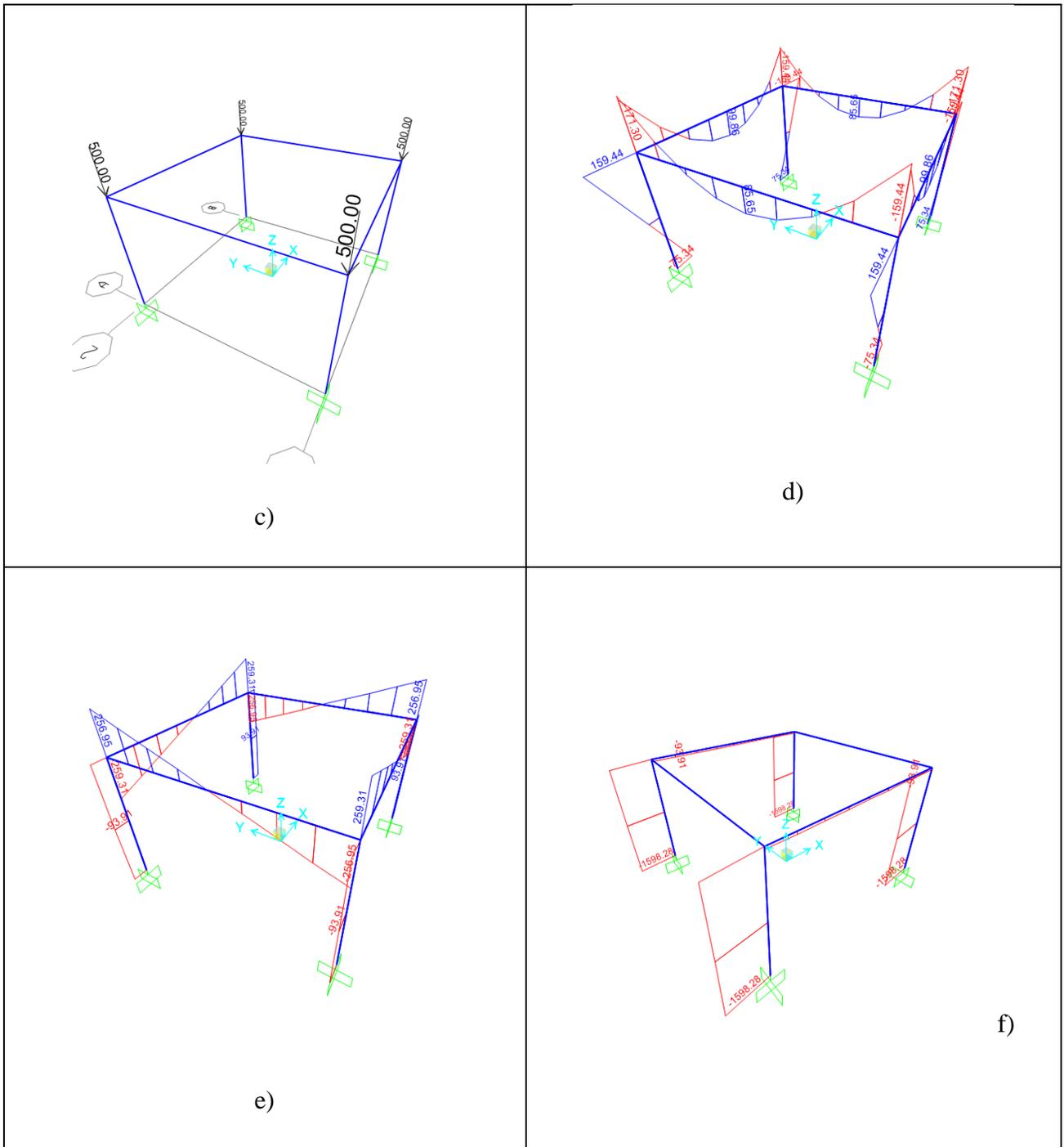


Figura 45. Marco de AI 514.0 reciclado modificado con 1.5% MWCNT. a) Elementos trabajando adecuadamente en amarillo y naranja según referencia de la derecha b) Carga viva aplicada de 200 Kg en cada articulación, c) Carga muerta de 500 Kg, d) Momento resistente 3-3, e) Esfuerzo cortante, f) Fuerza axial en elementos.

Tabla 26. Tabla obtenida de SAP2000. Propiedades mecánicas proporcionadas al aluminio.

Propiedades del aluminio							
Materia	Designación	Fcy	Fty	Fsy	Fy	Ftu	Fsu
Texto	Text	Kgf/m2	Kgf/m2	Kgf/m2	Kgf/m2	Kgf/m2	Kgf/m2
514_1.5_MWCNT	514.0	29255658	7554058	4361337.42	7554058	15787246	807615240

Tabla 27. Tabla obtenida de SAP2000. Diseño de Aluminio (Resumen de Datos -AA-LRFD-2000).

Diseño de Aluminio - Resumen de Datos - AA-LRFD 2000					
Elemento No.	Sección Tipo	Elemento Tipo	Ratio	Ubicación	Mensajes de Advertencia
Texto	Texto	Texto	s/u	m	Texto
9	I6X4.03	Columna	0.868751	2.5	Sin Mensajes
10	I6X4.03	Columna	0.868751	2.5	Sin Mensajes
11	I6X4.03	Columna	0.868751	2.5	Sin Mensajes
12	I6X4.03	Columna	0.868751	2.5	Sin Mensajes
13	I4X2.31	Viga	0.815795	4	Sin Mensajes
14	I3X2.03	Viga	0.905185	4	Sin Mensajes
15	I4X2.31	Viga	0.815795	4	Sin Mensajes
16	I3X2.03	Viga	0.905185	4	Sin Mensajes

Tabla 28. Tabla obtenida de SAP2000. Esfuerzos en cada elemento debido a las cargas actuantes.

Esfuerzos por elemento				
Elemento	Estación	P	V2	M3

Text	m	Kgf	Kgf	Kgf-m
9	0	-1598.28	-93.91	-75.34
9	2.5	-1556.26	-93.91	159.44
10	0	-1598.28	93.91	75.34
10	2.5	-1556.26	93.91	-159.44
11	0	-1598.28	93.91	75.34
11	2.5	-1556.26	93.91	-159.44
12	0	-1598.28	-93.91	-75.34
12	2.5	-1556.26	-93.91	159.44
13	0	-93.91	-259.31	-159.44
13	4	-93.91	259.31	-159.44
14	0	0	-256.95	-171.3
14	4	0	256.95	-171.3
15	0	-93.91	-259.31	-159.44
15	4	-93.91	259.31	-159.44
16	0	0	-256.95	-171.3
16	4	0	256.95	-171.3

Tabla 29. Tabla obtenida de SAP2000. Reacciones en articulaciones.

Reacciones en articulaciones						
Nodo	F1	F2	F3	M1	M2	M3
Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m
9	93.91	0	1598.28	0	75.34	0
11	-93.91	0	1598.28	0	-75.34	0
13	-93.91	0	1598.28	0	-75.34	0
15	93.91	0	1598.28	0	75.34	0

Tabla 30. Tabla obtenida de SAP2000. Desplazamientos en uniones de elementos debido a las cargas.

Desplazamientos en articulaciones			
Nodo	U1	U2	U3
Texto	m	m	M
9	0.00007	0	-0.000848

11	-0.00007	0	-0.000848
13	-0.00007	0	-0.000848
15	0.00007	0	-0.000848

Tabla 31. Tabla obtenida de SAP2000. Control del Software.

Control del Software			
NombrePrograma	Versión	Unidades	AlumCod
Texto	Texto	Texto	Texto
SAP2000	16.0.0	Kgf, m, C	AA-LRFD 2000

4.8.2 Cercha

En este caso se analizó una cercha de secciones PTR 3x3 cal. 7 en columnas, 2L2x2x1/8 en cuerdas inferiores y diagonales, 2L2x2x3/8 y 2L2.5 x3x3/8 en cuerdas superiores y PTR 4x2 cal. 14 en montenes/largueros, con carga muerta y viva puntual en cada nodo de 150 kg c/u y distribuida de 100 kg sobre los largueros. La intención es meramente ilustrativa para mostrar los esfuerzos y desplazamientos de los elementos ante tal tipo de cargas. La combinación para el análisis de carga elegido ha sido el más sencillo con un factor de 1.2 para carga muerta y 1.6 para carga viva. No se tomaron en cuenta condiciones de viento, sismo, lluvia, etc. debido a que solo se busca observar su estado de esfuerzos y desplazamientos ante un comportamiento básico.

Las propiedades mecánicas designadas a este marco son bajo el criterio de los aumentos correspondientes al 1.5% de MWNTC sobre la aleación 514.0 obtenidos en esta investigación, pero sobre aluminio 6061-T6.

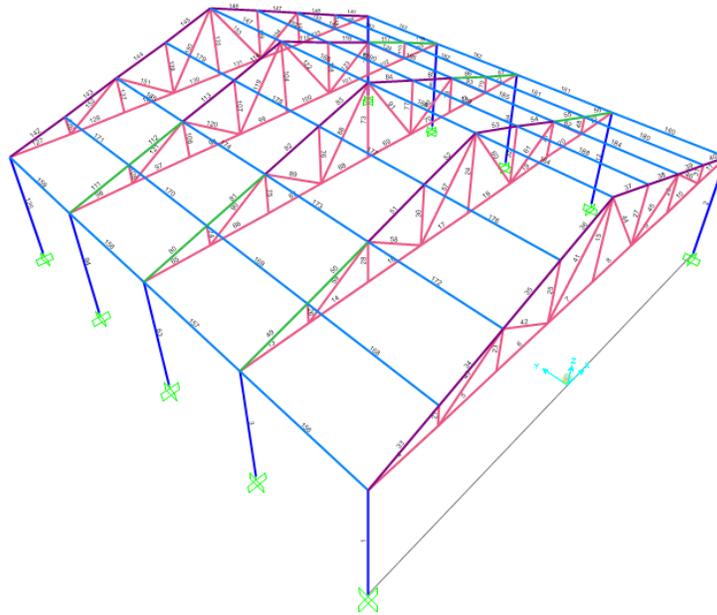
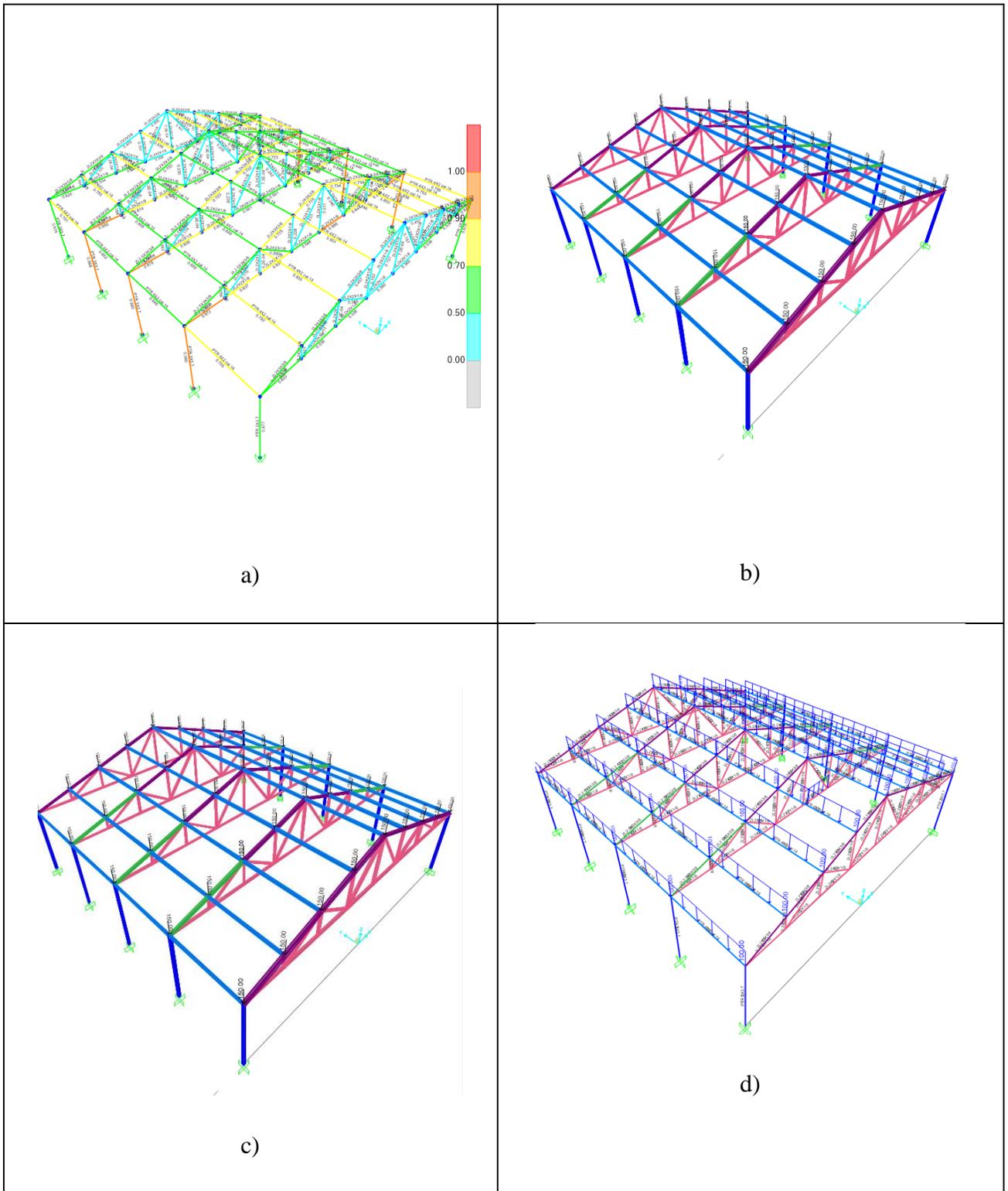


Figura 46. Análisis de esfuerzos en Sap2000 para una cercha de aluminio 6061 T6 bajo criterio de 1.5% de MWNTC.



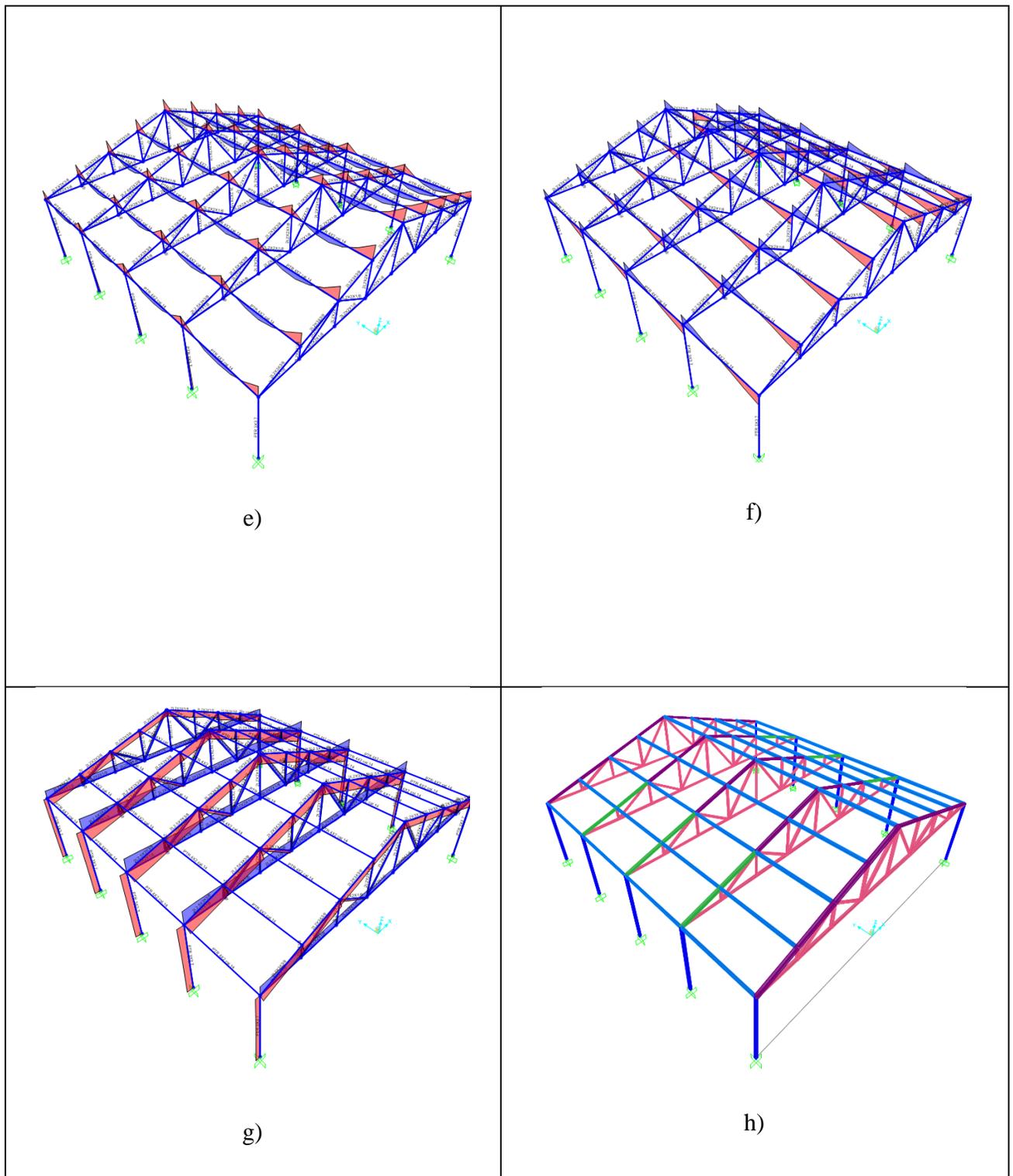


Figura 47. Cercha de Al 6061-T6 reciclado modificado con 1.5% MWCNT. a) Elementos trabajando adecuadamente en celeste, verde, amarillo y naranja según referencia de la derecha b) Carga viva aplicada

de 150 Kg en cada articulación, c) Carga muerta de 150 Kg, d) Carga muerta Distribuida de 100 kg sobre largueros, e) Momento resistente 3-3, f) Esfuerzo cortante, g) Fuerza axial en elementos, h) Elementos extruidos distinguidos por colores.

Tabla 32. Tabla obtenida de SAP2000. Propiedades mecánicas proporcionadas al aluminio.

Propiedades del Aluminio						
Material	AlumTipo	Alección	Fcy	Fty	Ftu	Fsu
Texto	Texto	Texto	Kgf/m2	Kgf/m2	Kgf/m2	Kgf/m2
6061-1.5 MWCNT	Sand Cast	514.0	24607436.91	35045912	26716645.79	18657142

Tabla 33. Tabla obtenida de SAP2000. Resumen de Datos para el diseño de Aluminio en algunos elementos representativos. Para una vista completa, revisar anexos.

Diseño de Aluminio - Resumen de Datos - AA-LRFD 2000					
3	PTR 3X3 cal. 7	Columna	0.989666	0	Sin Mensajes
22	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.979642	1	Sin Mensajes
39	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.638597	0.79057	Sin Mensajes
42	2L2X2X1/8	Diagonal	0.385198	0.90139	Sin Mensajes
76	2L2X2X1/8	Montante	0.237583	0	Sin Mensajes

Tabla 34. Tabla obtenida de SAP2000. Esfuerzos en algunos elementos representativos. Para una vista completa, revisar anexos.

Esfuerzos por elemento							
Elemento	Ubicación	P	V2	V3	T	M2	M3
3	0	-4676.01	-11.28	0	0	0	-32.77
3	3	-4663.41	-11.28	0	0	0	1.06
22	0	10964.53	-1.51	0	0	0	0
22	1.5	10964.53	1.51	0	0	0	-2.998E-16
39	0	-7326.76	-5.47	0	0	0	0
39	1.58114	-7330.4	5.47	0	0	0	-3.197E-15
42	0	-1188.85	-1.51	0	0	0	0
42	1.80278	-1186.84	1.51	0	0	0	1.066E-15
76	0	-1036.4	0	0	0	0	0
76	1.5	-1033.38	0	0	0	0	0

Tabla 35. Tabla obtenida de SAP2000. Reacciones en articulaciones.

Reacciones en articulaciones						
Art	F1	F2	F3	M1	M2	M3
Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m
1	6.28	0	2941.02	0	19.95	0
3	-6.27	0	2941.79	0	-19.93	0
12	11.28	0	4676.01	0	32.77	0
14	-11.3	0	4704.46	0	-32.82	0
37	10.82	0	4697.14	0	32.28	0
39	-10.81	0	4697.9	0	-32.26	0
55	10.85	0	4592.36	0	31.67	0
57	-10.85	0	4592.37	0	-31.66	0
73	6.29	0	2930.92	0	19.89	0
75	-6.29	0	2930.92	0	-19.88	0

Tabla 36. Tabla obtenida de SAP2000. Desplazamientos en primeros nodos. Para una vista completa, revisar anexos.

Desplazamientos en nodos			
Joint	U1	U2	U3
No.	m	m	m
1	0	0	0
2	-0.007202	0	-0.000886
3	0	0	0
4	0.007196	0	-0.000886
5	-0.005017	0	-0.020716
6	-0.003138	0	-0.028147

Tabla 37. Tabla obtenida de SAP2000. Control del Software.

TABLA: Control de Programa			
Software	Versión	Unidades	AlumCod.
SAP2000	16.0.0	Kgf, m, C	AA-LRFD 2000

5 CONCLUSIONES

Dentro del ámbito ingenieril, siempre se busca optimizar los procesos, con el menor tiempo, menor costo y mejor resultado. Si bien esto ha venido funcionando, es hora de encontrarle también el menor impacto ambiental así como el mejor uso de la tecnología.

Esta investigación ha buscado encontrar una alternativa ambientalmente amigable a los procesos comunes de empleo de materiales en el área estructural. Los resultados aquí presentados, pueden tener amplia relevancia si se toma en cuenta que existen otros metales que han sido perdidos de vista por diversos factores como el costo y su desempeño mecánico. Es apropiado, a partir de los avances científicos y tecnológicos convertirlos en materiales de utilidad para nuestras necesidades.

Tal es el caso del aluminio, siendo uno de los metales más abundante sobre la superficie terrestre y teniendo propiedades mecánicas tan peculiares, este trabajo plantea la opción de su uso dentro del área de la construcción y no solo para soportar vidrios, puertas, focos, etc. El aluminio tiene lo necesario para emplearse en papeles estructurales.

El aluminio si bien es económicamente “caro” para producirse por primera vez, es durante las miles de veces que puede reciclarse sin perder sus bondadosas cualidades a un costo accesible,(Tabla 8), además de que existe una amplia variedad de opciones para realizar este reciclaje. Todos con sus respectivas ventajas y áreas de oportunidad, teniendo al final un resultado óptimo y totalmente comerciable.

De acuerdo a los análisis obtenidos en la determinación del tipo de aleación de aluminio, se encontró que la resistencia a la compresión es uno de los elementos con mayor impacto seguido del módulo de elasticidad además de que el porcentaje más conveniente es 1.5%, dándonos entonces, el reto de mejorar propiedades tales como la resistencia a la tensión que pareciera disminuir debido, quizás al proceso de fundido y así potencialmente crear un elemento estructural con un material de esta calidad.

Es de vital importancia señalar que gracias a esta propuesta e investigación, fue posible observar que las propiedades mecánicas de la aleación 514 de aluminio no alcanzan una categoría estructural, sin embargo fue posible demostrar que con la implementación de un bajo porcentaje de nanotubos de carbono de paredes múltiples se pueden modificar propiedades mecánicas de modo que se le pueda dar a la aleación de aluminio más conveniente la capacidad de soportar condiciones de carga que no se han sido consideradas para un metal de esta clase.

El resultado más obvio que emerge de este estudio es que el aluminio, con su excelente relación de peso propio y resistencia a la tensión sumado a las cualidades encontradas que le proporcionan los nanotubo de carbono como el aumento en la dureza y en el módulo de elasticidad con un proceso tan sencillo como el ejecutado, abren una brecha a continuar investigando con diferentes concentraciones, bajo diferentes condiciones de carga, distintas aleaciones, etc.

Se encontrarán las herramientas faltantes que permitirán el desarrollo de un aluminio estructural que llegue incluso, a ser considerado una alternativa al acero pero con muy bajo costo de producción y con el mínimo daño al medio ambiente durante este.

Un factor que tiene vital importancia dentro del comportamiento mecánico del compuesto es por supuesto la adición de los nanotubos de carbono. En primer lugar, se tiene su acomodo, es decir la forma en que ya dentro de la matriz fundida del aluminio se fueron distribuyendo según se solidificaba el primero.

Por lo observado en la microestructura se encuentra que tendió a acumularse y formar grupos aglomerados en distintas ubicaciones. Estas aglomeraciones son considerablemente grandes en comparación con las porosidades también observadas.

Esto se debe al tipo de mezclado que se realizó en el taller de fundición que fue evidentemente simple y de corta duración debido a las condiciones que deben cumplirse para que el material

fundido no absorba mayor cantidad de oxígeno y se creen poros más grandes, también a la gran emanación de calor del horno que impide una exposición mayor a él.

Fue posible también determinar que el proceso de fundición, repercute directamente en la calidad de grano y de las porosidades dentro de la matriz compuesta, atribuyéndole a estos factores la disminución de los valores numéricos (Tabla 18) que se pueden observar al compararse con las propiedades estandarizadas de la aleación en cuestión.

De igual manera, fue posible encontrar cambios y mejoras mecánicas en el desempeño del material compuesto comparando cada uno de los distintos porcentajes de nanotubos de carbono con aquel que no fue incluido con estos nanoelementos.

De esta manera se observa que conforme aumenta la cantidad de nanotubos la propiedad que se mantiene proporcional y aumentando igualmente es el módulo de elasticidad, propiedad importante para elementos estructurales que serán sometidos a compresión y a flexión.

Si bien las latas de aluminio siempre tendrán un uso o mejor dicho, un reúso y reutilización en gran cantidad de industrias, es un material que siempre se encuentra disponible, que puede ser reciclado cuantas veces sean necesarias sin disminuir sus cualidades, su reciclaje es de bajísimo costo y principalmente es una primicia de lo que se podría conseguir con una aleación de mejor categoría estructural.

Las propiedades otorgadas por los nanotubos de carbono en un porcentaje menor a 1.5% en volumen a un material como el aluminio, pueden aprovecharse en elementos que serán sometidos principalmente a compresión y a tensiones menores como columnas y cuerdas superiores de una armadura.

El uso de este compuesto de aluminio reciclado aleación 514 (encontrada actualmente en la mayoría de las latas de bebidas) modificada con un porcentaje mínimo (0.0075% v/v) en elementos estructurales sencillos como un marco (columnas y trabes) con cargas ligeras (menos de 1 Ton) sería posible si se continuara con un estudio más profundo de fatiga ya que es una de las mayores preocupaciones de la aplicación del aluminio, pues de acuerdo a lo

observado en este estudio, los nanotubos de carbono incrementan mayormente la dureza de la matriz de aluminio (ver tabla 17).

Con este criterio como base, se puede concluir que si se continúa estudiando a este compuesto con aluminio 6061, sería posible disminuir a una tercera parte el peso de una estructura tradicional si sus elementos fueran hechos a base de este metal modificado con 1.5% v/v de NTC.

6 REFERENCIAS

- Allwood, C. J. M., Kong, H., & Pole, N. (2012). 1 Material wealth and health. *New York*, (C), 3–10. Retrieved from <http://www.withbotheyesopen.com/pdftransponder.php?c=100>
- Asgharzadeh, H., Joo, S.-H., & Kim, H. S. (2014). Consolidation of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composites by High-Pressure Torsion. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45(9), 4129–4137. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2354-6>
- Behaviour, M. (n.d.). *No Title*.
- Buchanan, C., Gardner, L., & Liew, A. (2016). The continuous strength method for the design of circular hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 118, 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.11.006>
- Bulson, P. S. (1996). *Aluminium structures - a guide to their specifications and design. Engineering Structures* (Vol. 18). [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(96\)90020-6](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(96)90020-6)
- Chen, B., Li, S., Imai, H., Jia, L., Umeda, J., & Takahashi, M. (2015). Carbon nanotube induced microstructural characteristics in powder metallurgy Al matrix composites and their effects on mechanical and conductive properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 651, 608–615. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.178>
- Dai, C. (2012). Development of Aluminium Dross-based Material for Engineering Applications.
- Das, S. K., Green, J. a S., & Kaufman, G. (2010). Aluminum recycling: Economic and environmental benefits. *Light Metal Age*, 68(1), 42–46. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-77949969951&partnerID=40&md5=d96ceab7bcbf8ec5f4be0757c4fd3f1f>

- Donald R. Askeland. (2005). Materiales Cerámicos. *Ciencia E Ingenieria de Los Materiales*.
- Edificacion, T. D. E. L. A. (1993). En *Cubiertas De Grandes Luces*, 7–16.
- Felipe, M. I., & Rodríguez, C. (2012). Introducción a los nanomateriales.
- Goh, C. S., Wei, J., Lee, L. C., & Gupta, M. (2008). Ductility improvement and fatigue studies in Mg-CNT nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 68(6), 1432–1439. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.10.057>
- González, E., & González, F. (2008). Síntesis por radiación con microondas de nanotubos de carbono. *Universitas Scientiarum*, 13, 258–266. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/unsc/v13n3/v13n3a05.pdf>
- Goosen, M. F. A. (2012). Environmental management and sustainable development. *Procedia Engineering*, 33, 6–13. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1171>
- Hidalgo, I., Szabo, L., Ciscar, J. C., & Soria, A. (2005). Technological prospects and CO2 emission trading analyses in the iron and steel industry: A global model. *Energy*, 30(5), 583–610. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.05.022>
- Hydro. (2012). “Aluminum, environment and society,” 5.
- Kang, K., Kim, J., Park, H., & Lee, C. (2016). Republic of Korea SC. *Surface & Coatings Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.01.030>
- Kaufman, J. G., & Rooy, E. L. (2004). *Aluminum Alloy Castings: Properties , Processes , and Applications*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Labandeira, X., León, C., & Vázquez, M. X. (2007). *Economía Ambiental*. Pearson Educación. Retrieved from <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/economia/econo62.htm>
- Li, H., Kang, J., He, C., Zhao, N., Liang, C., & Li, B. (2013). Mechanical properties and

interfacial analysis of aluminum matrix composites reinforced by carbon nanotubes with diverse structures. *Materials Science and Engineering A*, 577, 120–124. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.04.035>

Li, Q., Rottmair, C. A., & Singer, R. F. (2010). CNT reinforced light metal composites produced by melt stirring and by high pressure die casting. *Composites Science and Technology*, 70(16), 2242–2247. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.05.024>

Mart, I., Ca-, F., Fair, D., Arqu, P., & Sebasti, D. (2007). Boletín del Grupo Español del Carbón, 1–4.

Nie, J., Jia, C., Shi, N., Zhang, Y., Li, Y., & Jia, X. (2011). Aluminum matrix composites reinforced by molybdenum-coated carbon nanotubes. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 18(6), 695–702. <https://doi.org/10.1007/s12613-011-0499-5>

No Title. (n.d.).

Paul, D. R., & Robeson, L. M. (2008). Polymer nanotechnology: Nanocomposites. *Polymer*, 49(15), 3187–3204. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.04.017>

Samad, M. A., Sinha, S. K., Rivas, I. E., Raviathul Basariya, M., Srivastava, V. C., Mukhopadhyay, N. K., ... Gorji, M. S. (2014). Fabrication and mechanical properties of MWCNTs-reinforced aluminum composites by hot extrusion. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 613(4), 372–378. <https://doi.org/10.1007/s12613-011-0499-5>

Sarkis, J., Meade, L. M., & Presley, A. R. (2012). Incorporating sustainability into contractor evaluation and team formation in the built environment. *Journal of Cleaner Production*, 31, 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.029>

Shaymaa Abbas Abdulsada. (2016). Preparation of Aluminum Alloy from Recycling Cans Wastes. *Research Gate*, (October 2013).

Sinha Ray, S., & Okamoto, M. (2003). Polymer/layered silicate nanocomposites: A review from preparation to processing. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 28(11), 1539–1641. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002>

Zhu, W., & Bartos, M. (2004). Application of nanotechnology in construction S u m m a r y of a state-of-the-art report, 37(November), 649–658.

Zutshi, A., & Creed, A. (2015). An international review of environmental initiatives in the construction sector. *Journal of Cleaner Production*, 98, 92–106. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.077>

7 APÉNDICE

7.1 ARTÍCULOS PUBLICADOS

Recycled aluminum modified with MWCNT for structural spatial truss applications.

Ing. Alma Rosa Zamudio Méndez¹, M.C. Martha Elva Pérez Ramos², Dr. Karen Esquivel Escalante³

^{1,3}Departamento de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería, ²Laboratorio de Metalmeccánica

^{1,3}Universidad Autónoma de Querétaro, ²Instituto Tecnológico de Querétaro

¹almazamudio.22@gmail.com

²meprmx@yahoo.com.mx

³karen.esquivel@uaq.mx

Abstract— Due to the environmental damage caused for the steel manufacture, an alternate material that is less harmful to the ambience is proposed. It consists of recycling aluminum from beverage cans by melting and remelting in a furnace creating a composite reinforced with carbon nanotubes to magnify the mechanical properties of strength and being able to use it structurally where the strength-self-weight ratio is important as truss.

Keywords—recycled-aluminum; carbon nanotubes; reinforced composite.

I. INTRODUCTION

During the Steel and iron production, huge amount of raw sewage and air emissions are generated, besides it could cause many earth, water and air degradation if the manage isn't adequately [1].

Urban soils' pollution by heavy metals is a great concern issue because of its extensive toxicity, non-biodegradable and cumulative behavior. Urban soils are well recognized for being an accumulation of heavy metals and other pollutants from various sources and industrial activities (among others). This excessive accumulation of heavy metals deteriorates ecosystems, threaten human health and creates environmental problems [2].

Steel is commonly used to support great loads in frame shapes most of the times, but spatial structures or spatial truss are able to accomplish certain characteristics as the capacity of distribute the loads between its parts with the purpose of reduce the stress in each bar of direct loading and increase it in the further ones.

This structures are characterized by being composed of bars and nodes linked together forming an extremely strong and lightweight synergic mesh. It consist of at least parallel external meshes and a connecting internal one. The combination of these, turn into a complex geometric and repetitive network of polygons, polyhedral and equilateral triangles.

The stress must be equalize in the mayor of the elements, forming at the same time a homogeneous force field, giving great load capacities. Besides, it is important to mention its cost reduction due to the material reduction in the element sections because of the stress decrease.

Technology has allowed to reach significant designs of spatial truss and its behavior and stability analysis [3]

A. Corrosion in steel.

Corrosion is of great concern for a wide number of steel structures. Damages increase when the structures are often exposed to the sea or other harsh environments. Empirical evidence proves that corrosion slims down the material, changing its mechanical properties and in consequence its ultimate load capacities [4].

B. Aluminum: the alternative metal.

In the last decades, aluminum industry has introduced new emissions and energy reduced manufacturing techniques [5]. There is a myth that the aluminum is not resistant enough to serve as a structural metal. The truth is that common aluminum alloy (6061-T6) has a yield strength of 35 Ksi (240 Mpa) which isn't too far from steel A36 (240 to 340 Mpa). This strength, added to its very low weight (almost a third part from steel), makes the aluminum particularly advantageous for structural service where the dead load is of great concern. Its high strength-weight ratio has favored the aluminum usage in many applications such as bridges restoration, long gap slab, etc. In every case, the dead reduced load, in comparison with a conventional material, allows a longer life cycle [6].

Aluminum's greatest attribute is that it is corrosion resistant without any further treatment. Steel or "carbon steel" usually needs painted to protect it from rust and corrosion, especially if the steel part that works in a moist, damp or abrasive

environment. Carbon steel tends to self-destruction over time due to the base metal conversion to iron oxide commonly known as oxidation [56].

Aluminum is an effective structural and energetic material able to be exposed to high loads, including high pressures and temperatures [7]. And it can be easily obtained by recycling.

C. Aluminum recycling.

Aluminum is 100% recyclable without any loss of its mechanical and natural properties. It is required only a 26% of the original amount of energy to create aluminum through recycling. A 4% is necessary to produce a single can from primary aluminum [8]. And the other 22% comes from taking the lacquer off, manufacturing, stamping, etc.

According to a Metal Stock in Society report the global per capita stock of aluminum used in society is 80 kg coming from cars, buildings, electronics, etc.

Reis *et al.* (2014), choose aluminum cans to experiment with because of its stability after recycled which found useful for automotive parts production with high added value [9].

Besides aluminum's qualities as a light metal with high corrosion resistance and ductility its poor mechanical performance limits its trustable structural use for high loads. Nanomaterials have shown a total new road for nanomaterial-reinforced Al composites [10].

D. Multi-walled carbon nanotubes (MWCNT)

With the desire of increase its mechanical properties and using nanotechnology, the implementation of a composite aluminum - carbon nanotubes is proposed. Because many light structures are limited not only by the capacity of the material, also by the torsional resistance which depends directly on the Young's modulus and geometry.

CNTs can be laminated as a layer of graphite in tubular form (SWCNT) or tubes with multiple concentric walls (MWCNT or CNT).

Carbon nanotubes are stronger than steel but extremely lightweight and can withstand twisting and bending without fracturing. Theoretical calculations estimate that CNTs have a Young's modulus of 1 to 5 TPa for singular walls [11].

The mechanical reduction of MWCNT's is due to weak interactions between adjacent tubes. This limitation has recently been directed to the application of high energy electron irradiation connecting the outer layer and the inner

tubes effectively increasing the strength of these materials around 60 GPa [12].

Nanotubes are composed of "n" number of rows and "m" number of columns and the connection between them define the precise shape. A CNT is very thin, being about 10,000 times thinner than a human hair and hollow in the middle. Have good light absorption and good efficiency despite its length, usually they have a diameter of 1 nm, and its structure is basically a graphite layer of one atom thick wrapped until both limits meet, forming a tube. Obviously it is more difficult to define the size of the multiwalled nanotubes because of its dependence on the number of walls [13].

With the purpose of enhance the recycled aluminum mechanical properties as elasticity modulus and strength capacity, but maintaining its low density and based in many successful researches CNT and most of all MWCNT are ideal to achieve this concept [14]. Added to the good-natured qualities of the spatial truss there will be a proposal of "green structures" ideal for sustainable, great loaded and low self-weighted specifications.

II. EXPERIMENTAL PROCEDURE.

To produce 2.5 Kg of recycled aluminum there was needed more than 400 cans (Fig. 2 and 3). Each one was cleaned and lacquer removed, also the base and cap which are alloyed with magnesium were cut out. About 5 kg of prepared cans were melted in a silicon carbide crucible heated at more than 700°C (Fig. 1). It is profitable to understand the fundamentals and interactions of flow and heat inside a furnace. The heat is transferred from the hot combustion flue gases to the molten aluminum surface in the combustion chamber. In the upper part of the furnace, natural gas is mixed and burnt with air [15].



Figure 1. Furnace used. Supplied with a gas tank and a silicon carbide crucible.



Figure 2. Cans before and after lacquer removal.



Figure 3. Aluminum can completely treated. Lacquer, top and base removed.



Figure 4. Dross removed from the first melting.

Powders of Al / CNT processed by mechanical comminution are consolidated by conventional methods as hot pressing, hot extrusion and sintering spark plasma [16]

There will be used 1 mg multi-walled (MWCNT) dispersed in 100 cm² aluminum sheets with an airbrush at 0.01, 0.5, 1, 2 and 5, 7 and 10% V separately aggregated per trial. One way to

disperse the CNT is using a mechanical excitation with the attendance of an ultrasonic vibrator in ethanol [17].

The aluminum sheets will be bold in thin layers no longer than 10 cm and no wider than 2 cm so that this strips could fit in the bottom of the mold. When the liquid aluminum gets spill inside each mold, the strips will fuse together and solidify as an alloy.

A standard round test specimen will be machined according to ASTM E8 Tension Testing of Metallic Materials. Molds will be made of silica sand, bentonite and marine coal in an iron box.

Dross (Fig.2 4) will be removed chemically with a fondant and by hand with an iron bar, also a deoxidize agent will be added to the liquid aluminum before the spill into the molds to eliminate the mayor quantity of included oxygen.

III. RESULTS.

The ingots obtained were cooled with and without water and both were cut in one particular slice of 1 cm of width with an abrasive cutter Metacut 251 Metkon (Fig 5 a). Only one little pore was visible in each slice (Fig. 5 b).

Porosity percentage, nanotubes' conditions and dispersion inside the aluminum matrix, will be using scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM).

The material's ductility, will be determined from the total deformation until fracture with a tensile strength test useful to calculate elongation (assembling after fracture, the sample parts and measuring the distance between them previously marked) and area reduction (measuring the cross-section area of the sample parts after fracture).

This test will be subjected to an axial load through a lever, mechanical or hydraulic charge system which is in continuous increase. The measure must be done simultaneously as the sample elongation. This test provides information about the mechanical resistance of the materials to evaluate its correct design and acceptance under the norm ASTM E8 which controls the samples dimensions and test procedure.

To determine the elastic modulus will be removed a small percentage of the applied load so the extensometer returns to zero indicating that the load produced deformation is indeed an elastic one. So the real strength will be known by dividing the load between the existing cross-sectional area at that current load. The actual deformation is determined by dividing the change in length between the previous one. Table 1 shows the expected results compared with actual ones. Table 2 shows the way to obtain the Young modulus.



(a)



(b)

Figure 5. (a) Cut process with Abrasive cutter Metacut 251. (b) Slice after polished.

TABLE I. EXPECTED MECHANICAL PROPERTIES COMPARISON

	Steel A36	Aluminum 6061-T6	Recycled Al-CNT (expected)
Yield Strength (MPa)	240-340	240	+350
Young Modulus (Gpa)	199	69	+200
Density (kg/m ³)	7960	2750	2750
Strenght-Weight ratio	1-1.4	2.8	>2.8

Table 1. Properties comparison between Steel A36, Aluminum 6061-T6 and the composite proposal.

TABLE II. YOUNG MODULUS CALCULATION

	Equation	Symbol	Units
Stress	Tension/cross sectional area= F/A	σ	N/m ² =Pa
Strain	Extension per original length = $\Delta L/L$	E	No units
Young Modulus	Stress/strain	E	N/m ² =Pa

Table II. The values needed will be obtained from the stress-strain chart where the elastic and plastic region will determine the young modulus.

It is well known that porosity is an important defect that directly affects the mechanical properties, pressure tightness and corrosion resistance for Al castings [18]. It occurs when during the solidification, the evolution of the gases dissolution begins to decrease compared to the liquid aluminum.

Zhao *et al.* worked with pure aluminum A356 (7%Si) and Al-13%Si melted at 760°C in a resistance furnace with a silicon carbide crucible as well. They observed the gas bubble evolution during remelting using X-Ray micro-focus radiography and found out that without remelting, there were a high amount of pores dispersed over the metal matrix. After one remelting the pores decrease to 11 in the top of the sample but at the second remelting the pores disappeared almost completely.

During remelting process, two possible ways for porosity to evolve are to dissolve or to float out. But the second one is the most applied for degassing because dissolving usually becomes instable for the hydrogen molecules and the temperature control needed.

Remelting produce an important degassing process especially when two or more remelting times are effective. Actually it is better to increase the heat rate during remelting to get a more efficient degassing, besides it is also helpful reducing the inclusion content in the melt. It was provable when the slices where ready. Only one little pore where visible at the top of each one.

The effect produced by the tensile stress in the aluminum matrix and the compressive stress in the nanotubes has to be considered to estimate the interfacial mechanical properties of the composite [19].

CONCLUSION

There is a social need to develop new materials that combines environmental care and high technology to solve actual problems in our way of living. The proposal of recycling a popular metal that is available for all the people using a common way as melting but increasing its mechanical properties with nanotechnology for ensure its service and use to the needs of the construction industry in the search of limit the steel production, and in consequence an important source of pollution gives a chance to introduce new alternatives for the future society and new construction methods with materials more advantageous.

With two remelting process the quantity of pores will be almost null and the dispersion of the nanotubes will be mechanically controlled like previously researches demonstrate, the Al-NTC composite have shown to be a very hopeful new material ready to be structurally used to replace or to be used as well as the steel.

Porosity will be measured and compared with pure aluminum ingots to analyze the quantity of holes per superficial area to evaluate the evolution on porosity according the remelting process.

ACKNOWLEDGMENT

To Infra-254353-CONACyT for the financial support and to the ITQ's metallurgic lab for the facilities. Also A. Zamudio-Mendez thanks to CONACyT for the fellowship granted.

REFERENCES

- [1] J. J. M. H. y. W. B. Schueneman, *Air Pollution Aspects of the Iron and Steel Industry*, Washington D.C.: Public Health Series Publication 999 AP 1. PUnited States Department of Health and Human Services., 2000.
- [2] X. Qing, Z. Yutong and L. Shenggao, "Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, Northeast China," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 120, pp. 377-385, 2015.
- [3] Parke, G. A., & Howard, C. (1993). *Space Structures* (Vol. 1). Gran Bretaña: Telford.
- [4] S. Sultana, Y. Wang, J. Wharton and R. Sheno, "Influence of corrosion on the ultimate compressive strength of steel plates and stiffened panels," *Thin-Walled Structures*, vol. 96, pp. 95-104, 2015.
- [5] M. Calkins, "Metals," in *Materials for sustainable sites*, New York, Wiley, 2009.
- [6] K. & Ferry, *Aluminum Structures: A guide to their specifications and design*, 2da edición ed., New York: Wiley, 2002.
- [7] S.A. Gubin, I.V. Maklashova, A.A. Selezenev, S.A. Kozlova, "Molecular Dynamics Study Melting Aluminum at High Pressures". *Physics Procedia* 72 2015 338-341
- [8] J. M. Allwood and J. M. Cullen, "2. Scale, uncertainty and estimation," in *Sustainable materials with both eyes open*, Cambridge, UIT Cambridge, 2012, p. 21.
- [9] Angelo António Reis, José Roberto de Oliveira, Rodrigo Marques de Oliveira, Estéfano Aparecido Vieira. "Thixoforging of Al 3.8% Si alloy recycled from aluminum cans". *Materials Science & Engineering A* 607 2014 219-225.
- [10] Jong Gil Park, Dong Hoon Keum, Young Hee Lee. "Strengthening mechanisms in carbon nanotube-reinforced aluminum composites". *Carbon* 95 2015 690-698
- [11] I. Campillo, J. Dolado and A. Porro, "High performance nanostructured materials for construction," in *Nanotechnology in construction*, Cambridge, RSC, 2004, pp. 231-241.
- [12] G. Constantinides, *Nanoscience and nanoengineering of cement-based materials*, Cyprus: Cyprus University of Technology, 2011.
- [13] F. Pacheco-Torgal, D. M.V., N. A. and G. C-G., "Third generation photovoltaic PV cells for eco-efficient buildings and other applications," in *Nanotechnology in eco-efficient construction*, Woodhead publishing limited, 2013.
- [14] Sridhar A Karthic R. Narayanan, "Processing and characterization of MWCNT reinforced aluminum matrix composites", *J Mater Sci* 44 2009, pp 1750-1756.
- [15] A. Q. Fernando, "Síntesis de los nanotubos de carbono," in *Estructura y Síntesis de Nanotubos de Carbono*, Lima, Perú, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2005.
- [16] Ji-min WANG, Peng XU, Hong-jie YAN, Jie-min ZHOU, Shi-xuan LI, Guang-chen GUI, Wen-ke LI. "Burner effects on melting process of regenerative aluminum melting furnace". *Trans. Of Nonferrous Met. Soc. Of China* 23 (2013) 3125-3136
- [17] H. Asgharzadeh, S.-H. Joo and H. S. Kim, "Consolidation of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composites by High-Pressure Torsion." *The minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, vol. 45A, p. 4129, 2014.
- [18] Lei Zhao , Ye Pan , Hengcheng Liao , Qigui Wang. "Degassing of aluminum alloys during re-melting". *Materials Letters* 66 2012 328-331.
- [19] T. Kuzumaki, K. Miyazawa, H. Ichinose, K. Ito. "Processing of carbon nanotube reinforced aluminum composite". *J. Mat. Res.* 13 1998 2445-2450



UN MATERIAL COMPUESTO A BASE DE ALUMINIO RECICLADO REFORZADO CON NANOTUBOS DE CARBONO PARA USO ESTRUCTURAL

Recycled aluminum reinforced with carbon nanotubes composite for structural applications

Alma Rosa ZAMUDIO MÉNDEZ¹, Karen ESQUIVEL ESCALANTE²

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de Las Campanas, s/n, Las Campanas, 76010 Santiago de Querétaro, QRO, México. E-mail:almazamudio.22@gmail.com

²Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de Las Campanas, s/n, Las Campanas, 76010 Santiago de Querétaro, QRO, México. E-mail: karen.esquivel@uaq.mx

RESUMEN: El estado actual del medio ambiente cada vez más dañado por la explotación del humano de sus recursos naturales suplica por soluciones innovadores y ambientalmente amigables. Esta investigación propone un material compuesto hecho a base de aluminio reciclado de latas de bebidas reforzado con nanotubos de carbono para optimizar sus propiedades mecánicas de modo que pueda ser usado como un material para uso estructural en la industria de la construcción. Recientes estudios han mostrado los beneficios de añadir nanotubos de carbono a matrices de aluminio proporcionándole al metal una mayor capacidad de carga y resistencia a la fatiga. Nanotubos de carbono de paredes múltiples son dispersados a diferentes porcentajes de volumen en aluminio fundido para crear probetas de acuerdo a las normas ASTM 8M y ASTM 9 para pruebas de tensión y compresión, respectivamente. Así mismo, pruebas de microscopía electrónica de barrido, transmisión y rayos X proporcionan información como porosidad, estructura molecular y distribución de los nanotubos. Ecuaciones correspondientes a la Regla de Mezclas se usan para calcular analíticamente las propiedades mecánicas y compararlas con los resultados experimentales.

Palabras clave: aluminio reciclado, nanotubos de carbono, fundición, materiales compuestos.

ABSTRACT: The environment situation of degradation because of human extreme extraction of natural resources, request for innovative solutions. This investigation propose a composite made with recycled aluminum from beverage cans alloy with carbon nanotubes to improve its mechanical properties so it can be an optional material for structural applications. Many recent experiments have shown the benefits of the addition of nanotubes in the aluminum matrix giving to the metal higher load capacity and fatigue resistance improvement. Dispersed multi-walled carbon nanotubes in different volume fractions are added to the melted aluminum to create specific samples corresponding to ASTM E-8 norm for tensile and compressive tests. SEM, TEM and X-ray tests shows porosity percentage, aluminum structure and nanotubes distribution. Rule of mixture equations are calculated to compare analytical and experimental mechanical properties.

Key words: recycled aluminum, carbon nanotubes, smelting, composites.

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

1 INTRODUCCIÓN

Zutshi y Creed (2015) sostienen que es de gran importancia, para nuestra generación principalmente, desarrollar medios que permitan que el sector de la construcción impacte cada vez menos el medio ambiente e incorporar materiales que ayuden a prevenir una degradación apresurada e innecesaria de nuestros recursos naturales.

1.1 Nuevos materiales

Los materiales tradicionales y tan bien conocidos como los metales o los cerámicos son ideales para "mejorar" sus propiedades y obtener nuevas funciones. Esto puede lograrse al controlar su estructura a una nanoescala, con materiales extraordinarios como los nanotubos de carbono (NTC) cuya resistencia a la tensión llega a ser 100 veces la del acero (Zhu y Bartos, 2004).

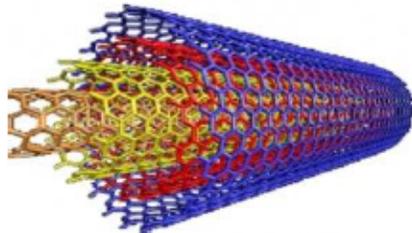


Figura 1. Nanotubo de carbono de paredes múltiples.

1.2 Aluminio Reciclado

Los metales poseen la característica de poder ser reutilizados en la gran mayoría de los casos. Pero metales como el aluminio (Al) cuyas características mecánicas son muy ventajosas en la construcción y que además pueden ser reciclados cuantas veces sean necesarias sin perder ninguna propiedad ahorrando más del 80% de energía permite que sea un material idóneo para estudiar y ser mejorado para darle uso estructural y no solo arquitectónico.

De acuerdo a Das et al., (2010), la cantidad de energía total para producir un kilogramo de aluminio primario, desde las pérdidas por transmisión hasta el combustible consumido en la transportación hacia los centros de ventas, es aproximadamente de 45 kWh y son emitidos cerca de 12 kg de CO₂.

Sin embargo, la energía gastada es recuperada con un mínimo de pérdidas una vez que es reciclado,

pues para ello, se requieren únicamente alrededor de 2.8 kWh y se emiten 0.6 kg de CO₂ para producir la misma cantidad.

1.3 Agente Reforzante

Es bien sabido que cualquier alotropía del carbón puede ser considerado un buen reforzante tanto de metales, como polímeros y cerámicos.

Aun así, Kuzumaki et al., (1998), sugieren que los nanotubos de carbono específicamente, son un excelente reforzante no solo por su gran módulo de elasticidad y su estabilidad química predecible, sino que además, comparado con las fibras de carbono o los *whiskers*, no generan reacciones a nivel molecular en la interfase o con la alineación de las fibras dentro de la matriz que afecten y disminuyan su resistencia a cualquier tipo de esfuerzo.

Este estudio busca, entonces, crear un material a base de aluminio reciclado reforzado con nanotubos de carbono para proporcionarle al aluminio propiedades mecánicas tales que pueda ser usado estructuralmente. Por lo tanto, al ser un material compuesto, se tomaron en cuenta teoría de mezclas que ayudan a predecir las propiedades buscadas como el módulo de elasticidad.

1.4 Materiales compuestos

Definiendo primero, lo que es un material compuesto, podríamos decir, por ejemplo que para Mott (2000), los materiales compuestos se dividen en dos partes fundamentales que son: una matriz de baja densidad y un relleno reforzante que proporcionará fuerza y rigidez, ambos unidos mecánica o adhesivamente. Obteniendo así, un material de alta resistencia y rigidez pero con un bajo peso propio comparado a su capacidad de carga.

Joshi y Upadhyay, (2014) aseguran que las propiedades de compuestos reforzados con NTC pueden ser estimadas con la regla de mezclas (ROM por sus siglas en inglés "*Rule of Mixtures*"):

$$\omega_c = \omega_{NTC} V_{NTC} + \omega_m (1 - V_{NTC}) \quad (1)$$

Donde ω_c es la propiedad específica por evaluar del compuesto tal como densidad, conductividad y resistencia, ω_{NTC} es la propiedad de los nanotubos de carbono correspondientes, ω_m es la propiedad del aluminio y V_{NTC} es la fracción de volumen de los nanotubos añadidos.

Diferentes autores han demostrado que los compuestos de aluminio con nanotubos de carbono

resultan en un material cuyas propiedades mecánicas se ven ampliamente mejoradas agregando bajas proporciones del reforzante. Por ejemplo, Esawi y Borady, (2006) añadieron 0.5% en peso de NTC a una matriz de Al y Deng et al., (2007) propusieron 1.0% también en peso, obteniendo en ambos casos resultados satisfactorios.

2 METODOLOGÍA

2.1 Recolección y preparación de latas de aluminio para reciclaje.

Esta investigación se inició recolectando cerca de 1000 latas de aluminio de todo tipo de bebidas, las cuales fueron limpiadas y a las cuales se les retiró la pintura, base y boquilla, obteniendo así, rectángulos de aluminio (Figura 2) listo para someterse a un proceso de fundición por medio de un horno de crisol A-60 a una temperatura de 700°C aproximadamente.



Figura 2. Hojas de latas de aluminio para reciclar.

De este modo, se crearon lingotes de aluminio con un peso total de 2.5 kg por cada cinco kg de "latas". Estos lingotes fueron sometidos a una prueba de microdureza de Vickers (Figura 3) para verificar que su dureza y por tanto, resistencia a la tensión era la misma que la del aluminio primario.



Figura 3. Prueba de microdureza de Vickers en lingote rebanado de aluminio reciclado con latas.

2.2 Nanotubos de carbono

A su vez, se prepararon hojas de papel aluminio de 10 cm² donde, con ayuda de un aerógrafo (copa de 9cc y caída por gravedad) se dispersaron los NTC al 0.05% en volumen previamente mezclados en acetona con un sonotrodo por 20 min, formando capas uniformes sobre toda la superficie de cada hoja. Éstas, en forma de pequeñas pelotas, fueron introducidas en la segunda fundición donde bajo las mismas condiciones y el mismo horno, se fundieron los lingotes antes elaborados.



Figura 4. Vertido de aluminio fundido en estado líquido con NTC en molde de arena.

2.3 Probetas para pruebas mecánicas

En esta segunda fundición (Figura 4) se prepararon a la par, moldes de arena sílice, bentonita sódica y cálcica al 4%, arcilla al 5% y esta mezcla humedecida al 5%, donde se vertió el compuesto en estado líquido formando una barra rectangular de 40 x 5 x 5 cm.

Posteriormente, esta misma barra fue labrada por un torno para formar 5 especímenes de acuerdo a la norma ASTM 8M (Figura 5) para ser sometidos a pruebas de tensión, 5 cilindros de acuerdo a la norma ASTM 9 para pruebas de compresión y 3 discos para pruebas SEM, TEM y XRD, se cuenta con la misma cantidad de especímenes con Al reciclado blanco, para comparar los resultados obtenidos por experimentación y analíticamente.

4 | Un material compuesto a base de aluminio reciclado reforzado con nanotubos de carbono para uso estructural.



Figura 5. Ejemplo de probeta para prueba de tensión torneada a partir de fundición.

la tensión, demostrando que no se perdieron propiedades mecánicas al reciclarse.

Análiticamente se puede observar en la tabla (1) el incremento del módulo de elasticidad al aumentar poco a poco la cantidad de NTC dentro de la matriz de aluminio. Empleando las ecuaciones:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (2)$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (3)$$

3 RESULTADOS

Las pruebas de microdureza realizadas con un HV de 0.200 gr por 0.15 seg mostraron un promedio de 75.7 HV, lo equivalente a 240MPa de Resistencia a

Obtenemos la siguiente gráfica (Figura 6), donde se puede observar que, de acuerdo a Hosford (2005), el módulo buscado se encuentra dentro de las dos líneas formadas por los valores de E obtenidos por las ecuaciones (2) y (3) formando líneas límites .

Tabla 1. Valores para calcular módulo de Elasticidad de acuerdo a ecuaciones (2) y (3) donde E_f se refiere al módulo de elasticidad de la fibra (NTC), V_f a la fracción de volumen de la fibra, E_m se refiere al módulo de elasticidad de la matriz (Al), V_m a la fracción de volumen de la matriz y E_c (2) y E_c (3) se refieren al módulo de elasticidad del compuesto de acuerdo a las ecuaciones 2 y 3 respectivamente, las cuales forman bordes límite dentro de los cuales se encontrará el valor experimental real.

E_f		V_f	E_m		V_m	E_c (2)		E_c (3)	
1000	GPa	0.0005	69	GPa	0.9995	69.47	GPa	69.03	GPa
1000	GPa	0.001	69	GPa	0.999	69.93	GPa	69.06	GPa
1000	GPa	0.005	69	GPa	0.995	73.66	GPa	69.32	GPa
1000	GPa	0.01	69	GPa	0.99	78.31	GPa	69.65	GPa
1000	GPa	0.02	69	GPa	0.98	87.62	GPa	70.31	GPa
1000	GPa	0.03	69	GPa	0.97	96.93	GPa	70.98	GPa

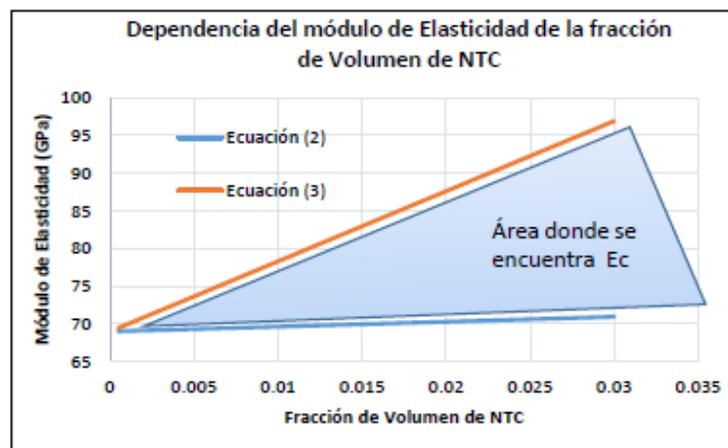


Figura 6. Gráfica donde se muestra el área específica del valor real de E del compuesto Al reciclado-NTC

4 CONCLUSIÓN

Es posible optimizar las propiedades mecánicas del aluminio de tal manera que se le puedan dar aplicaciones de índole estructural con mayores cargas y darle más protagonismo en la industria constructora. De esta manera, se estaría abriendo un brecha en el uso de residuos como son las latas de aluminio tan consumidas en todas las urbes.

Se ha demostrado que las propiedades del aluminio no decrecen por la cantidad de reciclaje que se le den y por el contrario el ahorro de energía es innegable proporcionando características de cuidado ambiental que tan necesarias se han vuelto hoy en día por la excesiva explotación de los recursos naturales.

Se espera que con porcentajes más altos en volumen de NTC las propiedades sean cada vez más ajustables a los requerimientos estructurales y proporcionar a la sociedad alternativas funcionales y ambientalmente amigables.

5 . REFERENCIAS

- Das, S. K., J. a S. Green, and G. Kaufman. 2010. Aluminum recycling: Economic and environmental benefits. *Light Met. Age* 68:42–46.
- Deng, C., P. Zhang, Y. Ma, X. Zhang, and D. Wang. 2009. Dispersion of multiwalled carbon nanotubes in aluminum powders. *Rare Met.* 28:175–180.
- Esawi, A. M. K., and M. A. El Borady. 2008. Carbon nanotube-reinforced aluminium strips. *Compos. Sci. Technol.* 68:486–492.
- Joshi, P., and S. H. Upadhyay. 2014. Effect of interphase on elastic behavior of multiwalled carbon nanotube reinforced composite. *Comput. Mater. Sci.* 87:267–273. Available from:
- Kuzumaki, T., K. Miyazawa, H. Ichinose, and K. Ito. 1998. Processing of carbon nanotube reinforced aluminum composite. :2445–2449.
- Preparation of Aluminum Alloy from Recycling Cans Wastes. 2016.
- Zutshi, A., and A. Creed. 2015. An international review of environmental initiatives in the construction sector. *J. Clean. Prod.* 98:92–106.
- Dai, C. 2012. Development of Aluminium Dross-based Material for Engineering Applications.
- Das, S. K., J. a S. Green, and G. Kaufman. 2010. Aluminum recycling: Economic and environmental benefits. *Light Met. Age* 68:42–46.
- Hydro. 2012. "Aluminum, environment and society." :5.
- William F. Hosford. *Mechanical Behavior of Materials*, Cambridge, 370-380
- Robert L. Mott. *Resistencia de Materiales Aplicada*, Pearson, p 410-415

7.2 ABSTRACT PARA PÓSTER



Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales A.C.

Recycled aluminum reinforced with carbon nanotubes for its use in spatial truss structures.

Karen Esquivel Escalante¹, Alma Rosa Zamudio Méndez², Martha Elva Pérez Ramos³, Eduardo Arturo Elizalde Peña⁴, José Ysmael Verde Gómez⁵

¹Ingeniería en Nanotecnología, Centro Académico Multidisciplinario, Campus UAQ-Aeropuerto Carr. A Chichimequillas S/N, Terrenos Ejidales Bolaños, Querétaro, Qro. CP. 76140 Universidad Autónoma de Querétaro

²División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas S/N, Querétaro, Qro.

³Departamento de Metal Mecánica, Instituto Tecnológico de Querétaro, Av. Tecnológico s/n, Centro, 76000 Santiago De Queretaro, Qro.

⁴Facultad de Ingeniería, Centro Académico Multidisciplinario, Campus UAQ-Aeropuerto Carr. A Chichimequillas S/N, Terrenos Ejidales Bolaños, Querétaro, Qro. CP. 76140 Universidad Autónoma de Querétaro

⁵Instituto Tecnológico de Cancún

Actual environmental situations requires actual solutions integrating technology and reuse of waste materials. This, will allow the reduction or prevention of the continuous degradation of the ecosystems and environmental problems. This investigation propose a composite made with recycled aluminum from beverage cans alloy with carbon nanotubes to provide structural properties for its use in spatial truss.

According to the SENER (Mexican Energy Secretary), the total national energy consumption in 2014 was of 8,624.26 PJ, from which 18.18% was produced by the industry. From this last percentage, the 13.5% was exclusively by the steel and iron production. Aluminum on the other hand, requires about 168 GJ/T to be produced from the mineral Al_2O_3 , but only 7 GJ/T to produce the same amount from scrap. Aluminum's high strength-weight ratio has been very useful in the construction, aerospace and automotive areas. Recycled aluminum made of melted cans has a hardness of 75 HV which according to Vickers Hardness Conversion Table its yield strength is also 240 Mpa and this proves stability after recycled.

Even when aluminum shows corrosion resistance qualities, isn't a material used for structural purposes. Therefore, many recent experiments have shown the benefits of the addition of nanotubes in the aluminum matrix giving to the metal higher load capacity and fatigue resistance improvement.

1 mg of dispersed multi-walled carbon nanotubes in percentages of volume of 0.05%, 0.1%, 0.5%, 1%, 2%, 5%, 7% and 10% are added to the liquid aluminum to form specific measuring samples corresponding to ASTM E-8 norm for tensile and compressive tests. Scanning electron microscopy, X-ray and transmission electron microscopy tests shows porosity percentage, aluminum structure and nanotubes distribution.

Mechanical resistance properties such as elastic modulus and real strength obtained from these test are introduced in a structural software to realize and analysis of a spatial truss with 288 elements, 85 nodes and 255 freedom degrees. Diverse loads are applied in order to get to know the deformation of the elements and nodes displacement.

7.3 CONSTANCIAS DE PARTICIPACIÓN

La División de Investigación y Posgrado otorga el siguiente reconocimiento a:

Alma R. Zamudio M

Por haber obtenido el

1º Lugar

Con su póster titulado

**“Aluminio reciclado reforzado con NTC
para uso estructural”**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIPFI POSGRADO INGENIERÍA

Otorgan la presente CONSTANCIA a:

Alma R. Zamudio M.
Karen Esquivel E.

Por póster publicado:
"Aluminio reciclado reforzado con NTC para uso estructural"



26 de noviembre de 2015

Dr. Aurelio Domínguez González
DIRECTOR
FACULTAD DE INGENIERÍA

Dr. Maribel Toledano Ayala
JEFE DE LA DIVISION DE INVESTIGACION Y POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE
QUERÉTARO



12° CONGRESO
INTERNACIONAL DE INGENIERÍA

La UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
a través de la
FACULTAD DE INGENIERÍA,
otorga la presente

CONSTANCIA

A:

A. R Zamudio, M. E. Pérez y K. Esquivel

Por haber presentado el trabajo.

**Recycled aluminum modified with MWCNT for
structural truss applications.**

Dentro de la duodécima edición del
Congreso Internacional de Ingeniería
realizado del 01 al 6 de Mayo del 2016
en la ciudad de Santiago de Querétaro, México.







Dr. Aurelio Domínguez González
Director



Dra. Karen Esquivel Escalante
Coordinadora del Congreso
Internacional de Ingeniería



***IX International Conference on Surfaces,
Materials and Vacuum
September 26th to 30th, 2016
Mazatlan, Mexico***

**Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología
de Superficies y Materiales**

The Conference Organizing Committee certifies that

**Karen Esquivel Escalante, Alma Rosa Zamudio Méndez,
Martha Elva Pérez Ramos, Eduardo Arturo Elizalde Peña,
José Ysmael Verde Gómez**

presented the following poster contribution

263- NSN

**"Recycled aluminum reinforced with carbon nanotubes for
its use in spatial truss structures."**

**Dr. Juan Hernández Rosas
President SMCTSM**

7.4 TABLAS COMPLETAS DEL ANÁLISIS DE CERCHA

Tabla 38. Tabla obtenida de SAP2000. Diseño de Aluminio (Resumen de Datos -AA-LRFD-2000).

Diseño de Aluminio - Resumen de Datos - AA-LRFD 2000					
Elemento No.	Sección Tipo	Elemento Tipo	Ratio	Ubicación	Mensajes de Advertencia
Texto	Texto	Texto	s/u	m	Texto
1	PTR 3X3 7	Columna	0.677483	0	Sin Mensajes
2	PTR 3X3 7	Columna	0.677615	0	Sin Mensajes
4	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.622718	1	Sin Mensajes
5	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.536149	1	Sin Mensajes
6	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.536149	1	Sin Mensajes
7	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.359832	1	Sin Mensajes
8	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.359832	1	Sin Mensajes
9	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.53629	1	Sin Mensajes
10	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.53629	1	Sin Mensajes
11	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.622921	1	Sin Mensajes
15	2L2X2X1/8	Diagonal	0.000732	2	Sin Mensajes
21	2L2X2X1/8	Diagonal	0.101156	0	Sin Mensajes
23	2L2X2X1/8	Diagonal	0.000523	1	Sin Mensajes
25	2L2X2X1/8	Diagonal	0.151564	0	Sin Mensajes
27	2L2X2X1/8	Diagonal	0.151675	0	Sin Mensajes
29	2L2X2X1/8	Diagonal	0.000523	1	Sin Mensajes
31	2L2X2X1/8	Diagonal	0.101229	0	Sin Mensajes
33	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.638456	0.79057	Sin Mensajes

34	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.638383	0.79057	Sin Mensajes
35	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.457018	0.79057	Sin Mensajes
36	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.457047	0.79057	Sin Mensajes
37	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.457119	0.79057	Sin Mensajes
38	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.45709	0.79057	Sin Mensajes
39	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.638597	0.79057	Sin Mensajes
40	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.638669	0.79057	Sin Mensajes
41	2L2X2X1/8	Diagonal	0.157195	1.25	Sin Mensajes
42	2L2X2X1/8	Diagonal	0.385198	0.90139	Sin Mensajes
43	2L2X2X1/8	Diagonal	0.111059	0.90139	Sin Mensajes
44	2L2X2X1/8	Diagonal	0.157309	1.25	Sin Mensajes
45	2L2X2X1/8	Diagonal	0.385512	0.90139	Sin Mensajes
46	2L2X2X1/8	Diagonal	0.111134	0.90139	Sin Mensajes
3	PTR 3X3 cal. 7	Columna	0.989666	0	Sin Mensajes
12	PTR 3X3 cal. 7	Columna	0.995994	0	Sin Mensajes
13	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.972049	1	Sin Mensajes
14	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.836714	1	Sin Mensajes
16	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.836714	1	Sin Mensajes
17	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.568064	1	Sin Mensajes
18	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.979894	1	Sin Mensajes
19	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.84443	1	Sin Mensajes
20	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.84443	1	Sin Mensajes
22	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.979642	1	Sin Mensajes
24	2L2X2X1/8	Montante	0.011292	2	Sin Mensajes
26	2L2X2X1/8	Montante	0.158567	0	Sin Mensajes
28	2L2X2X1/8	Montante	0.000523	1	Sin Mensajes

30	2L2X2X1/8	Montante	0.228375	0	Sin Mensajes
32	2L2X2X1/8	Montante	0.228154	0	Sin Mensajes
47	2L2X2X1/8	Montante	0.000523	1	Sin Mensajes
48	2L2X2X1/8	Montante	0.158421	0	Sin Mensajes
49	2L2.5X3X3/8	Cuerda Superior	0.561609	0.79057	Sin Mensajes
50	2L2.5X3X3/8	Cuerda Superior	0.561652	0.79057	Sin Mensajes
51	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.725473	0.79057	Sin Mensajes
52	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.725444	0.79057	Sin Mensajes
53	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.734136	0.79057	Sin Mensajes
54	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.734168	0.79057	Sin Mensajes
55	2L2.5X3X3/8	Cuerda Superior	0.566073	0.79057	Sin Mensajes
56	2L2.5X3X3/8	Cuerda Superior	0.566032	0.79057	Sin Mensajes
57	2L2X2X1/8	Diagonal	0.233307	1.25	Sin Mensajes
58	2L2X2X1/8	Diagonal	0.589631	0.90139	Sin Mensajes
59	2L2X2X1/8	Diagonal	0.16967	0.90139	Sin Mensajes
60	2L2X2X1/8	Diagonal	0.246409	1.25	Sin Mensajes
61	2L2X2X1/8	Diagonal	0.588983	0.90139	Sin Mensajes
62	2L2X2X1/8	Diagonal	0.169521	0.90139	Sin Mensajes
63	PTR 3X3 7	Columna	0.992833	0	Sin Mensajes
64	PTR 3X3 7	Columna	0.992947	0	Sin Mensajes
65	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.977694	1	Sin Mensajes
66	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.838867	1	Sin Mensajes
67	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.838867	1	Sin Mensajes
68	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.560873	1	Sin Mensajes
69	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.560873	1	Sin Mensajes
70	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.839006	1	Sin Mensajes

71	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.839006	1	Sin Mensajes
72	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.977893	1	Sin Mensajes
73	2L2X2X1/8	Montante	0.000732	2	Sin Mensajes
74	2L2X2X1/8	Montante	0.162677	0	Sin Mensajes
75	2L2X2X1/8	Montante	0.000523	1	Sin Mensajes
76	2L2X2X1/8	Montante	0.237583	0	Sin Mensajes
77	2L2X2X1/8	Montante	0.237692	0	Sin Mensajes
78	2L2X2X1/8	Montante	0.000523	1	Sin Mensajes
79	2L2X2X1/8	Montante	0.162748	0	Sin Mensajes
80	2L2.5X3X3/8	Cuerda Superior	0.564693	0.79057	Sin Mensajes
81	2L2.5X3X3/8	Cuerda Superior	0.564694	0.79057	Sin Mensajes
82	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.722501	0.79057	Sin Mensajes
83	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.722497	0.79057	Sin Mensajes
84	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.722574	0.79057	Sin Mensajes
85	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.722577	0.79057	Sin Mensajes
86	2L2.5X3X3/8	Cuerda Superior	0.564809	0.79057	Sin Mensajes
87	2L2.5X3X3/8	Cuerda Superior	0.564807	0.79057	Sin Mensajes
88	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.241473	1.25	Sin Mensajes
89	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.609501	0.90139	Sin Mensajes
90	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.173865	0.90139	Sin Mensajes
91	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.241586	1.25	Sin Mensajes
92	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.60982	0.90139	Sin Mensajes
93	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.173938	0.90139	Sin Mensajes
94	PTR 3X3 7	Columna	0.968408	0	Sin Mensajes
95	PTR 3X3 7	Columna	0.96838	0	Sin Mensajes
96	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.949805	1	Sin Mensajes

97	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.813952	1	Sin Mensajes
98	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.813952	1	Sin Mensajes
99	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.543794	1	Sin Mensajes
100	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.543794	1	Sin Mensajes
101	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.813955	1	Sin Mensajes
102	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.813955	1	Sin Mensajes
103	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.949809	1	Sin Mensajes
104	2L2X2X1/8	Montante	0.000732	2	Sin Mensajes
105	2L2X2X1/8	Montante	0.159176	0	Sin Mensajes
106	2L2X2X1/8	Montante	0.000523	1	Sin Mensajes
107	2L2X2X1/8	Montante	0.229937	0	Sin Mensajes
108	2L2X2X1/8	Montante	0.229939	0	Sin Mensajes
109	2L2X2X1/8	Montante	0.000523	1	Sin Mensajes
110	2L2X2X1/8	Montante	0.159178	0	Sin Mensajes
111	2L2.5X3X3/8	Cuerda Superior	0.548618	0.79057	Sin Mensajes
112	2L2.5X3X3/8	Cuerda Superior	0.54865	0.79057	Sin Mensajes
113	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.699665	0.79057	Sin Mensajes
114	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.699638	0.79057	Sin Mensajes
115	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.69964	0.79057	Sin Mensajes
116	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.699666	0.79057	Sin Mensajes
117	2L2.5X3X3/8	Cuerda Superior	0.548652	0.79057	Sin Mensajes
118	2L2.5X3X3/8	Cuerda Superior	0.54862	0.79057	Sin Mensajes
119	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.23465	1.25	Sin Mensajes
120	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.592768	0.90139	Sin Mensajes
121	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.170291	0.90139	Sin Mensajes
122	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.234652	1.25	Sin Mensajes

123	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.592774	0.90139	Sin Mensajes
124	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.170292	0.90139	Sin Mensajes
125	PTR 3X3 7	Columna	0.675096	0	Sin Mensajes
126	PTR 3X3 7	Columna	0.675079	0	Sin Mensajes
127	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.620015	1	Sin Mensajes
128	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.533688	1	Sin Mensajes
129	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.533688	1	Sin Mensajes
130	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.358083	1	Sin Mensajes
131	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.358083	1	Sin Mensajes
132	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.533688	1	Sin Mensajes
133	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.533688	1	Sin Mensajes
134	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.620015	1	Sin Mensajes
135	2L2X2X1/8	Montante	0.000732	2	Sin Mensajes
136	2L2X2X1/8	Montante	0.10087	0	Sin Mensajes
137	2L2X2X1/8	Montante	0.000523	1	Sin Mensajes
138	2L2X2X1/8	Montante	0.150825	0	Sin Mensajes
139	2L2X2X1/8	Montante	0.150826	0	Sin Mensajes
140	2L2X2X1/8	Montante	0.000523	1	Sin Mensajes
141	2L2X2X1/8	Montante	0.10087	0	Sin Mensajes
142	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.635619	0.79057	Sin Mensajes
143	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.635555	0.79057	Sin Mensajes
144	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.454869	0.79057	Sin Mensajes
145	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.454896	0.79057	Sin Mensajes
146	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.454896	0.79057	Sin Mensajes
147	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.454869	0.79057	Sin Mensajes
148	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.635555	0.79057	Sin Mensajes

149	2L2X3X3/8	Cuerda Superior	0.635619	0.79057	Sin Mensajes
150	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.156561	1.25	Sin Mensajes
151	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.383764	0.90139	Sin Mensajes
152	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.110768	0.90139	Sin Mensajes
153	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.156561	1.25	Sin Mensajes
154	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.383764	0.90139	Sin Mensajes
155	2L2X2X1/8	Cuerda Inferior	0.110768	0.90139	Sin Mensajes
156	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.70537	0	Sin Mensajes
157	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.647969	0	Sin Mensajes
158	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.652237	3	Sin Mensajes
159	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.701113	3	Sin Mensajes
160	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.705768	0	Sin Mensajes
161	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.648201	3	Sin Mensajes
162	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.652226	3	Sin Mensajes
163	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.701105	3	Sin Mensajes
164	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.846002	0	Sin Mensajes
165	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.649488	3	Sin Mensajes
166	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.663691	3	Sin Mensajes
167	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.829288	3	Sin Mensajes
168	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.791503	0	Sin Mensajes
169	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.649745	0	Sin Mensajes
170	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.659362	3	Sin Mensajes
171	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.78153	3	Sin Mensajes
172	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.835059	0	Sin Mensajes
173	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.648927	0	Sin Mensajes
174	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.662945	3	Sin Mensajes

175	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.822161	3	Sin Mensajes
176	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.850803	0	Sin Mensajes
177	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.647955	0	Sin Mensajes
178	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.664217	3	Sin Mensajes
179	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.835749	3	Sin Mensajes
180	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.793325	0	Sin Mensajes
181	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.64861	3	Sin Mensajes
182	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.659386	3	Sin Mensajes
183	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.781522	3	Sin Mensajes
184	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.8381	0	Sin Mensajes
185	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.64937	3	Sin Mensajes
186	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.66302	3	Sin Mensajes
187	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.822171	3	Sin Mensajes
188	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.853143	0	Sin Mensajes
189	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.649696	3	Sin Mensajes
190	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.664267	3	Sin Mensajes
192	PTR 4X2 cal.14	Larguero	0.835759	0	Sin Mensajes

Tabla 39. Tabla obtenida de SAP2000. Esfuerzos en cada elemento debido a las cargas actuantes

Esfuerzos por elemento							
Elemento	Ubicación	P	V2	V3	T	M2	M3
Texto	m	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m
1	0	-2941.02	-6.28	0	0	0	-19.95
1	3	-2928.41	-6.28	0	0	0	-1.1
2	0	-2941.79	6.27	0	0	0	19.93
2	3	-2929.19	6.27	0	0	0	1.1
3	0	-4676.01	-11.28	0	0	0	-32.77
3	3	-4663.41	-11.28	0	0	0	1.06
4	0	6948.43	-1.51	0	0	0	0
4	1.5	6948.43	1.51	0	0	0	-2.998E-16
5	0	5974.36	-1.51	0	0	0	0
5	1.5	5974.36	1.51	0	0	0	-2.998E-16
6	0	5974.36	-1.51	0	0	0	0
6	1.5	5974.36	1.51	0	0	0	-2.998E-16
7	0	3990.44	-1.51	0	0	0	0
7	1.5	3990.44	1.51	0	0	0	-2.998E-16
8	0	3990.44	-1.51	0	0	0	0
8	1.5	3990.44	1.51	0	0	0	-2.998E-16
9	0	5975.94	-1.51	0	0	0	0
9	1.5	5975.94	1.51	0	0	0	-2.998E-16
10	0	5975.94	-1.51	0	0	0	0
10	1.5	5975.94	1.51	0	0	0	-2.998E-16
11	0	6950.72	-1.51	0	0	0	0
11	1.5	6950.72	1.51	0	0	0	-2.998E-16
12	0	-4704.46	11.3	0	0	0	32.82
12	3	-4691.86	11.3	0	0	0	-1.07
13	0	10879.1	-1.51	0	0	0	0
13	1.5	10879.1	1.51	0	0	0	-2.998E-16
14	0	9356.31	-1.51	0	0	0	0
14	1.5	9356.31	1.51	0	0	0	-2.998E-16
15	0	3.02	0	0	0	0	0
15	2	7.06	0	0	0	0	0
16	0	9356.31	-1.51	0	0	0	0
16	1.5	9356.31	1.51	0	0	0	-2.998E-16
17	0	6333.47	-1.51	0	0	0	0
17	1.5	6333.47	1.51	0	0	0	-2.998E-16
18	0	6333.47	-121.51	0	0	0	0
18	1.5	6333.47	121.51	0	0	0	-2.998E-16
19	0	9443.13	-1.51	0	0	0	0
19	1.5	9443.13	1.51	0	0	0	-2.998E-16

20	0	9443.13	-1.51	0	0	0	0
20	1.5	9443.13	1.51	0	0	0	-2.998E-16
21	0	-644.54	0	0	0	0	0
21	0.5	-643.53	0	0	0	0	0
22	0	10964.53	-1.51	0	0	0	0
22	1.5	10964.53	1.51	0	0	0	-2.998E-16
23	0	3.02	0	0	0	0	0
23	1	5.04	0	0	0	0	0
24	0	123.02	0	0	0	0	0
24	2	127.06	0	0	0	0	0
25	0	-661.16	0	0	0	0	0
25	1.5	-658.14	0	0	0	0	0
26	0	-1010.36	0	0	0	0	0
26	0.5	-1009.35	0	0	0	0	0
27	0	-661.65	0	0	0	0	0
27	1.5	-658.62	0	0	0	0	0
28	0	3.02	0	0	0	0	0
28	1	5.04	0	0	0	0	0
29	0	3.02	0	0	0	0	0
29	1	5.04	0	0	0	0	0
30	0	-996.23	0	0	0	0	0
30	1.5	-993.21	0	0	0	0	0
31	0	-645.01	0	0	0	0	0
31	0.5	-644	0	0	0	0	0
32	0	-995.27	0	0	0	0	0
32	1.5	-992.24	0	0	0	0	0
33	0	-7328.83	-5.47	0	0	0	0
33	1.58114	-7325.18	5.47	0	0	0	-3.197E-15
34	0	-7328	-5.47	0	0	0	0
34	1.58114	-7324.36	5.47	0	0	0	-3.197E-15
35	0	-5259.66	-5.47	0	0	0	0
35	1.58114	-5256.02	5.47	0	0	0	-3.197E-15
36	0	-5259.99	-5.47	0	0	0	0
36	1.58114	-5256.34	5.47	0	0	0	-3.197E-15
37	0	-5257.19	-5.47	0	0	0	0
37	1.58114	-5260.83	5.47	0	0	0	-3.197E-15
38	0	-5256.85	-5.47	0	0	0	0
38	1.58114	-5260.49	5.47	0	0	0	-3.197E-15
39	0	-7326.76	-5.47	0	0	0	0
39	1.58114	-7330.4	5.47	0	0	0	-3.197E-15
40	0	-7327.56	-5.47	0	0	0	0
40	1.58114	-7331.2	5.47	0	0	0	-3.197E-15

41	0	1661.3	-1.51	0	0	0	0
41	2.5	1657.26	1.51	0	0	0	-2.132E-15
42	0	-1188.85	-1.51	0	0	0	0
42	1.80278	-1186.84	1.51	0	0	0	1.066E-15
43	0	1171.7	-1.51	0	0	0	0
43	1.80278	1169.68	1.51	0	0	0	1.066E-15
44	0	1662.58	-1.51	0	0	0	0
44	2.5	1658.55	1.51	0	0	0	-2.132E-15
45	0	-1189.83	-1.51	0	0	0	0
45	1.80278	-1187.82	1.51	0	0	0	1.066E-15
46	0	1172.54	-1.51	0	0	0	0
46	1.80278	1170.52	1.51	0	0	0	1.066E-15
47	0	3.02	0	0	0	0	0
47	1	5.04	0	0	0	0	0
48	0	-1009.43	0	0	0	0	0
48	0.5	-1008.42	0	0	0	0	0
49	0	-11485.41	-6.05	0	0	0	0
49	1.58114	-11481.38	6.05	0	0	0	-1.332E-15
50	0	-11486.28	-6.05	0	0	0	0
50	1.58114	-11482.25	6.05	0	0	0	-1.332E-15
51	0	-8285.42	-5.47	0	0	0	0
51	1.58114	-8281.78	5.47	0	0	0	-3.197E-15
52	0	-8285.11	-5.47	0	0	0	0
52	1.58114	-8281.46	5.47	0	0	0	-3.197E-15
53	0	-8374.65	-5.47	0	0	0	0
53	1.58114	-8378.29	5.47	0	0	0	-3.197E-15
54	0	-8374.99	-5.47	0	0	0	0
54	1.58114	-8378.63	5.47	0	0	0	-3.197E-15
55	0	-11572.32	-6.05	0	0	0	0
55	1.58114	-11576.35	6.05	0	0	0	-1.332E-15
56	0	-11571.5	-6.05	0	0	0	0
56	1.58114	-11575.53	6.05	0	0	0	-1.332E-15
57	0	2517.7	-1.51	0	0	0	0
57	2.5	2513.67	1.51	0	0	0	-2.132E-15
58	0	-1819.93	-1.51	0	0	0	0
58	1.80278	-1817.91	1.51	0	0	0	1.066E-15
59	0	1831.18	-1.51	0	0	0	0
59	1.80278	1829.17	1.51	0	0	0	1.066E-15
60	0	2665.13	-1.51	0	0	0	0
60	2.5	2661.1	1.51	0	0	0	-2.132E-15
61	0	-1817.96	-1.51	0	0	0	0
61	1.80278	-1815.94	1.51	0	0	0	1.066E-15

62	0	1829.5	-1.51	0	0	0	0
62	1.80278	1827.49	1.51	0	0	0	1.066E-15
63	0	-4697.14	-10.82	0	0	0	-32.28
63	3	-4684.54	-10.82	0	0	0	0.18
64	0	-4697.9	10.81	0	0	0	32.26
64	3	-4685.3	10.81	0	0	0	-0.17
65	0	10942.62	-1.51	0	0	0	0
65	1.5	10942.62	1.51	0	0	0	-2.998E-16
66	0	9380.54	-1.51	0	0	0	0
66	1.5	9380.54	1.51	0	0	0	-2.998E-16
67	0	9380.54	-1.51	0	0	0	0
67	1.5	9380.54	1.51	0	0	0	-2.998E-16
68	0	6252.55	-1.51	0	0	0	0
68	1.5	6252.55	1.51	0	0	0	-2.998E-16
69	0	6252.55	-1.51	0	0	0	0
69	1.5	6252.55	1.51	0	0	0	-2.998E-16
70	0	9382.1	-1.51	0	0	0	0
70	1.5	9382.1	1.51	0	0	0	-2.998E-16
71	1.5	9382.1	1.51	0	0	0	-2.998E-16
72	0	10944.85	-1.51	0	0	0	0
72	1.5	10944.85	1.51	0	0	0	-2.998E-16
73	0	3.02	0	0	0	0	0
73	2	7.06	0	0	0	0	0
74	0	-1036.54	0	0	0	0	0
74	0.5	-1035.53	0	0	0	0	0
75	0	3.02	0	0	0	0	0
75	1	5.04	0	0	0	0	0
76	0	-1036.4	0	0	0	0	0
76	1.5	-1033.38	0	0	0	0	0
77	0	-1036.88	0	0	0	0	0
77	1.5	-1033.85	0	0	0	0	0
78	0	3.02	0	0	0	0	0
78	1	5.04	0	0	0	0	0
79	0	-1037	0	0	0	0	0
79	0.5	-1035.99	0	0	0	0	0
80	0	-11548.25	-6.05	0	0	0	0
80	1.58114	-11544.22	6.05	0	0	0	-1.332E-15
81	0	-11548.27	-6.05	0	0	0	0
82	0	-8253.43	-5.47	0	0	0	0
82	1.58114	-8249.79	5.47	0	0	0	-3.197E-15
83	0	-8253.39	-5.47	0	0	0	0
83	1.58114	-8249.75	5.47	0	0	0	-3.197E-15

84	0	-8250.58	-5.47	0	0	0	0
84	1.58114	-8254.22	5.47	0	0	0	-3.197E-15
85	0	-8250.61	-5.47	0	0	0	0
85	1.58114	-8254.25	5.47	0	0	0	-3.197E-15
86	0	-11546.58	-6.05	0	0	0	0
86	1.58114	-11550.62	6.05	0	0	0	-1.332E-15
87	0	-11546.54	-6.05	0	0	0	0
87	1.58114	-11550.58	6.05	0	0	0	-1.332E-15
88	0	2609.59	-1.51	0	0	0	0
88	2.5	2605.56	1.51	0	0	0	-2.132E-15
89	0	-1880.04	-1.51	0	0	0	0
89	1.80278	-1878.02	1.51	0	0	0	1.066E-15
90	0	1878.39	-1.51	0	0	0	0
90	1.80278	1876.37	1.51	0	0	0	1.066E-15
91	0	2610.85	-1.51	0	0	0	0
91	2.5	2606.82	1.51	0	0	0	-2.132E-15
92	0	-1881	-1.51	0	0	0	0
92	1.80278	-1878.98	1.51	0	0	0	1.066E-15
93	0	1879.21	-1.51	0	0	0	0
93	1.80278	1877.19	1.51	0	0	0	1.066E-15
94	0	-4592.36	-10.85	0	0	0	-31.67
94	3	-4579.75	-10.85	0	0	0	0.88
95	0	-4592.37	10.85	0	0	0	31.66
95	3	-4579.77	10.85	0	0	0	-0.88
96	0	10628.81	-1.51	0	0	0	0
96	1.5	10628.81	1.51	0	0	0	-2.998E-16
97	0	9100.2	-1.51	0	0	0	0
97	1.5	9100.2	1.51	0	0	0	-2.998E-16
98	0	9100.2	-1.51	0	0	0	0
98	1.5	9100.2	1.51	0	0	0	-2.998E-16
99	0	6060.37	-1.51	0	0	0	0
99	1.5	6060.37	1.51	0	0	0	-2.998E-16
100	0	6060.37	-1.51	0	0	0	0
100	1.5	6060.37	1.51	0	0	0	-2.998E-16
101	0	9100.23	-1.51	0	0	0	0
101	1.5	9100.23	1.51	0	0	0	-2.998E-16
102	0	9100.23	-1.51	0	0	0	0
102	1.5	9100.23	1.51	0	0	0	-2.998E-16
103	0	10628.86	-1.51	0	0	0	0
103	1.5	10628.86	1.51	0	0	0	-2.998E-16
104	0	3.02	0	0	0	0	0
104	2	7.06	0	0	0	0	0

105	0	-1014.23	0	0	0	0	0
105	0.5	-1013.22	0	0	0	0	0
106	0	3.02	0	0	0	0	0
106	1	5.04	0	0	0	0	0
107	0	-1003.05	0	0	0	0	0
107	1.5	-1000.02	0	0	0	0	0
108	0	-1003.06	0	0	0	0	0
108	1.5	-1000.03	0	0	0	0	0
109	0	3.02	0	0	0	0	0
109	1	5.04	0	0	0	0	0
110	0	-1014.24	0	0	0	0	0
110	0.5	-1013.24	0	0	0	0	0
111	0	-11220.49	-6.05	0	0	0	0
111	1.58114	-11216.45	6.05	0	0	0	-1.332E-15
112	0	-11221.13	-6.05	0	0	0	0
112	1.58114	-11217.1	6.05	0	0	0	-1.332E-15
113	0	-8005.78	-5.47	0	0	0	0
113	1.58114	-8002.14	5.47	0	0	0	-3.197E-15
114	0	-8005.5	-5.47	0	0	0	0
114	1.58114	-8001.85	5.47	0	0	0	-3.197E-15
115	0	-8001.87	-5.47	0	0	0	0
115	1.58114	-8005.51	5.47	0	0	0	-3.197E-15
116	0	-8002.15	-5.47	0	0	0	0
116	1.58114	-8005.8	5.47	0	0	0	-3.197E-15
117	0	-11217.15	-6.05	0	0	0	0
117	1.58114	-11221.18	6.05	0	0	0	-1.332E-15
118	0	-11216.5	-6.05	0	0	0	0
118	1.58114	-11220.53	6.05	0	0	0	-1.332E-15
119	0	2532.81	-1.51	0	0	0	0
119	2.5	2528.78	1.51	0	0	0	-2.132E-15
120	0	-1829.44	-1.51	0	0	0	0
120	1.80278	-1827.42	1.51	0	0	0	1.066E-15
121	0	1838.17	-1.51	0	0	0	0
121	1.80278	1836.15	1.51	0	0	0	1.066E-15
122	0	2532.84	-1.51	0	0	0	0
122	2.5	2528.81	1.51	0	0	0	-2.132E-15
123	0	-1829.46	-1.51	0	0	0	0
123	1.80278	-1827.44	1.51	0	0	0	1.066E-15
124	0	1838.19	-1.51	0	0	0	0
124	1.80278	1836.17	1.51	0	0	0	1.066E-15
125	0	-2930.92	-6.29	0	0	0	-19.89
125	3	-2918.31	-6.29	0	0	0	-1.02

126	0	-2930.92	6.29	0	0	0	19.88
126	3	-2918.31	6.29	0	0	0	1.02
127	0	6918.01	-1.51	0	0	0	0
127	1.5	6918.01	1.51	0	0	0	-2.998E-16
128	0	5946.66	-1.51	0	0	0	0
128	1.5	5946.66	1.51	0	0	0	-2.998E-16
129	0	5946.66	-1.51	0	0	0	0
129	1.5	5946.66	1.51	0	0	0	-2.998E-16
130	0	3970.76	-1.51	0	0	0	0
130	1.5	3970.76	1.51	0	0	0	-2.998E-16
131	0	3970.76	-1.51	0	0	0	0
131	1.5	3970.76	1.51	0	0	0	-2.998E-16
132	0	5946.66	-1.51	0	0	0	0
132	1.5	5946.66	1.51	0	0	0	-2.998E-16
133	0	5946.66	-1.51	0	0	0	0
133	1.5	5946.66	1.51	0	0	0	-2.998E-16
134	0	6918.01	-1.51	0	0	0	0
134	1.5	6918.01	1.51	0	0	0	-2.998E-16
135	0	3.02	0	0	0	0	0
135	2	7.06	0	0	0	0	0
136	0	-642.72	0	0	0	0	0
136	0.5	-641.72	0	0	0	0	0
137	0	3.02	0	0	0	0	0
137	1	5.04	0	0	0	0	0
138	0	-657.94	0	0	0	0	0
138	1.5	-654.92	0	0	0	0	0
139	0	-657.94	0	0	0	0	0
139	1.5	-654.92	0	0	0	0	0
140	0	3.02	0	0	0	0	0
140	1	5.04	0	0	0	0	0
141	0	-642.72	0	0	0	0	0
141	0.5	-641.72	0	0	0	0	0
142	0	-7297.07	-5.47	0	0	0	0
142	1.58114	-7293.42	5.47	0	0	0	-3.197E-15
143	0	-7296.35	-5.47	0	0	0	0
143	1.58114	-7292.71	5.47	0	0	0	-3.197E-15
144	0	-5234.83	-5.47	0	0	0	0
144	1.58114	-5231.18	5.47	0	0	0	-3.197E-15
145	0	-5235.14	-5.47	0	0	0	0
145	1.58114	-5231.5	5.47	0	0	0	-3.197E-15
146	0	-5231.5	-5.47	0	0	0	0
146	1.58114	-5235.14	5.47	0	0	0	-3.197E-15

147	0	-5231.18	-5.47	0	0	0	0
147	1.58114	-5234.83	5.47	0	0	0	-3.197E-15
148	0	-7292.71	-5.47	0	0	0	0
148	1.58114	-7296.36	5.47	0	0	0	-3.197E-15
149	0	-7293.42	-5.47	0	0	0	0
149	1.58114	-7297.07	5.47	0	0	0	-3.197E-15
150	0	1654.16	-1.51	0	0	0	0
150	2.5	1650.13	1.51	0	0	0	-2.132E-15
151	0	-1184.37	-1.51	0	0	0	0
151	1.80278	-1182.36	1.51	0	0	0	1.066E-15
152	0	1168.42	-1.51	0	0	0	0
152	1.80278	1166.41	1.51	0	0	0	1.066E-15
153	0	1654.16	-1.51	0	0	0	0
153	2.5	1650.13	1.51	0	0	0	-2.132E-15
154	1.80278	-1182.36	1.51	0	0	0	1.066E-15
155	0	1168.42	-1.51	0	0	0	0
155	1.80278	1166.41	1.51	0	0	0	1.066E-15
156	0	0	-424.14	-3.71	-1.1	-5.56	-213.45
156	3	0	421.38	-3.71	-1.1	5.56	-209.31
157	0	0	-422.77	0.01687	-0.04009	0.0253	-211.4
157	3	0	422.74	0.01687	-0.04009	-0.0253	-211.35
158	0	0	-422.67	0.3	0.14	0.45	-211.25
158	3	0	422.84	0.3	0.14	-0.45	-211.5
159	0	0	-421.43	3.42	1.02	5.13	-209.39
159	3	0	424.08	3.42	1.02	-5.13	-213.36
160	0	0	-424.16	3.73	1.1	5.6	-213.48
160	3	0	421.35	3.73	1.1	-5.6	-209.27
161	0	0	-422.75	-0.03728	0.03435	-0.05592	-211.37
161	3	0	422.76	-0.03728	0.03435	0.05592	-211.39
162	0	0	-422.67	-0.3	-0.14	-0.45	-211.25
162	3	0	422.84	-0.3	-0.14	0.45	-211.5
163	0	0	-421.43	-3.42	-1.02	-5.13	-209.39
163	3	0	424.08	-3.42	-1.02	5.13	-213.36
164	0	0	-466.33	0.02691	0	0.04037	-276.74
164	3	0	379.19	0.02691	0	-0.04037	-146.02
165	0	0	-422.43	-0.02637	0	-0.03956	-210.89
165	3	0	423.08	-0.02637	0	0.03956	-211.87
166	0	0	-419.18	0.0002182	0	0.0003273	-206.01
166	3	0	426.34	0.0002182	0	-	-216.75
167	0	0	-382.72	0.0003032	0	0.0004548	-151.33

167	3	0	462.79	0.0003032	0	- 0.0004548	-271.43
168	0	0	-452.27	-0.78	0	-1.17	-255.65
168	3	0	393.24	-0.78	0	1.17	-167.11
169	0	0	-423.08	0.04652	0	0.06978	-211.86
169	3	0	422.44	0.04652	0	-0.06978	-210.9
170	0	0	-420.34	0.06353	0	0.0953	-207.76
170	3	0	425.17	0.06353	0	-0.0953	-215
171	0	0	-395.1	0.68	0	1.02	-169.89
171	3	0	450.42	0.68	0	-1.02	-252.87
172	0	0	-463.38	0.22	0	0.33	-272.32
172	3	0	382.13	0.22	0	-0.33	-150.44
173	0	0	-422.95	0.02758	0	0.04137	-211.67
173	3	0	422.56	0.02758	0	-0.04137	-211.08
174	0	0	-419.4	-0.01774	0	-0.02662	-206.34
174	3	0	426.11	-0.01774	0	0.02662	-216.41
175	0	0	-384.95	-0.23	0	-0.34	-154.67
175	3	0	460.56	-0.23	0	0.34	-268.09
176	0	0	-466.51	0.31	0	0.47	-277.01
176	3	0	379	0.31	0	-0.47	-145.74
177	0	0	-422.79	0.01141	0	0.01711	-211.42
177	3	0	422.73	0.01141	0	-0.01711	-211.33
178	0	0	-419.14	-0.02569	0	-0.03854	-205.95
178	3	0	426.37	-0.02569	0	0.03854	-216.8
179	0	0	-382.22	-0.3	0	-0.45	-150.57
179	3	0	463.3	-0.3	0	0.45	-272.19
180	0	0	-452.73	0.76	0	1.14	-256.34
180	3	0	392.79	0.76	0	-1.14	-166.42
181	0	0	-422.62	-0.02429	0	-0.03644	-211.17
181	3	0	422.89	-0.02429	0	0.03644	-211.58
182	0	0	-420.33	-0.06144	0	-0.09216	-207.74
182	3	0	425.18	-0.06144	0	0.09216	-215.02
183	0	0	-395.1	-0.68	0	-1.01	-169.89
183	3	0	450.42	-0.68	0	1.01	-252.87
184	0	0	-463.96	-0.25	0	-0.37	-273.18
184	3	0	381.55	-0.25	0	0.37	-149.57
185	0	0	-422.38	0.001113	0	0.00167	-210.81
185	3	0	423.14	0.001113	0	-0.00167	-211.95
186	0	0	-419.39	0.01959	0	0.02938	-206.33
186	3	0	426.13	0.01959	0	-0.02938	-216.43
187	0	0	-384.95	0.23	0	0.34	-154.67
187	3	0	460.56	0.23	0	-0.34	-268.09

188	0	0	-466.99	-0.32	0	-0.48	-277.73
188	3	0	378.52	-0.32	0	0.48	-145.02
189	0	0	-422.31	-0.001575	0	-0.002363	-210.7
189	3	0	423.21	-0.001575	0	0.002363	-212.05
190	0	0	-419.13	0.027	0	0.0405	-205.94
190	3	0	426.38	0.027	0	-0.0405	-216.81
192	0	0	-463.3	0.3	0	0.45	-272.19
192	3	0	382.22	0.3	0	-0.45	-150.57

Tabla 40. Tabla obtenida de SAP2000. Desplazamientos en uniones de elementos debido a las cargas.

Desplazamientos en nodos			
Joint	U1	U2	U3
Text	m	m	m
1	0	0	0
2	-0.007202	0	- 0.000886
3	0	0	0
4	0.007196	0	- 0.000886
5	-0.005017	0	- 0.020716
6	-0.003138	0	- 0.028147
7	-0.001259	0	- 0.029928
8	-0.000003929	0	- 0.029785
9	0.001251	0	-0.02993
10	0.00313	0	- 0.028151
11	0.00501	0	- 0.020721
12	0	0	0
13	-0.01133	0	-0.00141
14	0	0	0

15	-0.00000272	0	- 0.029783
16	0.011348	0	- 0.001418
17	-0.007909	0	-0.03187
18	-0.004966	0	- 0.043553
19	-0.001277	0	- 0.020784
20	0.000468	0	- 0.028146
21	0.000623	0	- 0.030135
22	-0.00063	0	- 0.030138
23	-0.000475	0	- 0.028151
24	0.00127	0	- 0.020789
25	-0.002024	0	- 0.046415
26	-0.000032	0	- 0.046357
27	0.00196	0	-0.0466
28	0.00493	0	- 0.043776
29	0.0079	0	- 0.032048
30	0.000027	0	- 0.046305
31	-0.002144	0	- 0.031975
32	0.000711	0	- 0.043552
33	0.000969	0	- 0.046728
34	-0.000985	0	- 0.046913
35	-0.000749	0	- 0.043775
36	0.002114	0	- 0.032154

37	0	0	0
38	-0.011311	0	- 0.001416
39	0	0	0
40	0.011306	0	- 0.001416
41	-0.00787	0	- 0.031989
42	-0.00492	0	- 0.043628
43	-0.00197	0	- 0.046414
44	-0.000003279	0	- 0.046183
45	0.001963	0	- 0.046416
46	0.004914	0	- 0.043632
47	0.007864	0	- 0.031993
48	-0.000002116	0	- 0.046181
49	-0.002093	0	- 0.032097
50	0.000742	0	- 0.043627
51	0.000982	0	- 0.046739
52	-0.000987	0	- 0.046742
53	-0.000748	0	- 0.043631
54	0.002087	0	- 0.032102
55	0	0	0
56	-0.010974	0	- 0.001384
57	0	0	0
58	0.010971	0	- 0.001384
59	-0.007632	0	- 0.031075

60	-0.00477	0	- 0.042355
61	-0.001908	0	- 0.045053
62	-0.000001897	0	- 0.044826
63	0.001904	0	- 0.045053
64	0.004766	0	- 0.042355
65	0.007628	0	- 0.031075
66	-0.000001873	0	- 0.044824
67	-0.002022	0	- 0.031181
68	0.000722	0	- 0.042354
69	0.000953	0	- 0.045368
70	-0.000957	0	- 0.045368
71	-0.000726	0	- 0.042354
72	0.002018	0	- 0.031181
73	0	0	0
74	-0.007166	0	- 0.000883
75	0	0	0
76	0.007163	0	- 0.000883
77	-0.004991	0	- 0.020625
78	-0.00312	0	- 0.028019
79	-0.00125	0	-0.02979
80	-0.000001536	0	- 0.029646
81	0.001247	0	-0.02979
82	0.003117	0	- 0.028019

83	0.004988	0	- 0.020625
84	-0.000001535	0	- 0.029644
85	-0.001268	0	- 0.020692
86	0.000468	0	- 0.028018
87	0.000622	0	- 0.029996
88	-0.000625	0	- 0.029996
89	-0.000471	0	- 0.028018
90	0.001265	0	- 0.020692