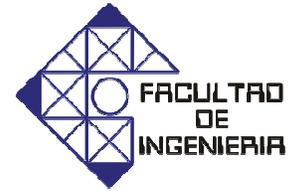




UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



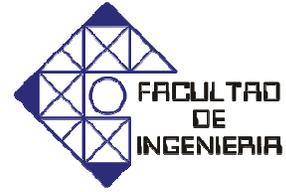
## **Evaluación del comportamiento a torsión de la aleación AA6063 tratada térmicamente**

Dassler Otto  
Sanjuan Gabriel

Valencia, Octubre de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## **Evaluación del comportamiento a torsión de la aleación AA6063 tratada térmicamente**

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para optar  
al título de Ingeniero Mecánico*

**Tutor académico:**  
Msc. Ing. Juan C. Pereira

**Autores:**  
Dassler Otto  
Sanjuan Gabriel

Valencia, Octubre de 2009

### ***Agradecimientos***

Al Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, y a todo su personal docente, técnico y administrativo por su colaboración prestada a lo largo de la realización de gran parte de los ensayos experimentales.

Al CDCH-UC por haber financiado gran parte de los recursos económicos necesarios para desarrollar la investigación.

A la empresa Aluminios de Venezuela C.A, por habernos suministrado el material requerido para realizar nuestro trabajo de grado.

Al taller de metalmecánica CEDENPLAS C.A, lugar en el cual se realizó la fabricación de las probetas requeridas para el desarrollo de la investigación.

A la empresa manufacturera de pistones PC PISTONS C.A, en cuyas instalaciones se realizaron los ensayos de dureza Brinell Estándar.

A la empresa ALUCASA y a todo su personal técnico, por facilitar sus instalaciones y equipos para la realización de la preparación metalográfica de las probetas.

A todas y cada una de las personas que de alguna manera nos ayudaron a que esta investigación se realizara.

***Gabriel. Sanjuan y Otto Dassler***

## ***Dedicatoria***

Primero y antes que todo, dar gracias a Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente, por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y por su compañía durante todo el periodo de estudio.

Agradecer hoy y por siempre a mi familia, ya que se preocuparon por mi bienestar, y está claro que si no fuese por el esfuerzo realizado por ellos, mis estudios de pre-grado universitario no hubiesen sido posibles. A mis padres, mis hermanos por el ánimo, apoyo y alegría que me brindan me dan la fortaleza necesaria para seguir adelante.

A mis padrinos por su más sincera colaboración, ayuda y consejos en el desarrollo de mi carrera profesional, a quienes estoy eternamente agradecido.

A aquellas personas que han compartido el mayor tiempo a mi lado porque, en su compañía las cosas malas se convierten en buenas, la tristeza se transforma en la alegría y la soledad no existe.

***Gabriel Sanjuan***

### *Dedicatoria*

Primeramente a Dios por haberme dado la sabiduría necesaria y la fuerza requerida a lo largo de toda esta trayectoria universitaria.

A mis padres por ser siempre durante toda la carrera ese apoyo incondicional en las buenas y en las malas, por tener siempre unas palabras de aliento en las situaciones más difíciles, por su esfuerzo y dedicación en todo momento logrando así que siempre me mantuviera centrado en mis estudios. Que a pesar de las muchas preocupaciones que he causado durante tantos días y tantas noches estando lejos de ellos, no me cabe la menor duda de que no hay personas en este mundo más orgullosas y felices que ellos porque yo esté logrando esta meta.

A mi hermana y su esposo por su apoyo constante desde el inicio del camino, y sus consejos a lo largo del mismo.

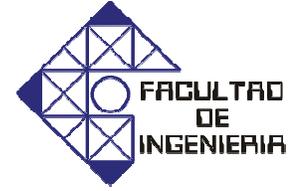
A mi hermano y su esposa por tener una palabra de apoyo en todo momento.

A Carolina De Andrade por estar siempre conmigo apoyándome en gran parte de la carrera.

*Otto H. Dassler L.*



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## “EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A TORSIÓN DE LA ALEACIÓN AA6063 TRATADA TÉRMICAMENTE”

### Resumen

El objetivo general de este trabajo de grado fue evaluar el comportamiento a torsión de la aleación de aluminio AA6063 tratada térmicamente. Para llevar a cabo este trabajo fue necesario aplicar tres tratamientos térmicos como lo son Recocido (O), Endurecimiento por precipitación y Envejecimiento Natural (T4) y Endurecimiento por Precipitación y Envejecimiento Artificial (T6), de manera de describir el comportamiento mecánico de la aleación para dichos tratamientos térmicos así como para la condición de entrega (T5). Para llevar a cabo este trabajo fue necesario determinar las propiedades mecánicas a tracción, torsión así como la variación de la dureza para cada condición de tratamiento térmico y la condición de entrega (T5). Las probetas ensayadas fueron cilíndricas macizas tanto para los ensayos de tracción como los de torsión, con la diferencia de que los extremos de las probetas de torsión tenían los extremos cuadrados, condición requerida por la máquina para realizar los ensayos de torsión. Las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de torsión y tracción fueron afectadas significativamente por la aplicación de los tratamientos térmicos, produciendo un aumento en los esfuerzos de fluencia a tracción y a corte, así como en los esfuerzos últimos para ambos ensayos, además de una disminución de la ductilidad del material para los tratamientos térmicos de precipitación con respecto al recocido (O). La variación de dureza experimentó un incremento con la aplicación de los tratamientos térmicos de precipitación, obteniéndose la mayor dureza para T6. Una vez que se determinaron las propiedades mecánicas a tracción y torsión se procedió a determinar las relaciones entre el esfuerzo de fluencia a tracción y el esfuerzo de fluencia a corte para cada condición del material, obteniéndose que los valores experimentales para los tratamientos térmicos de precipitación y la condición de entrega del material (T5) se acercan mucho mejor al criterio de Von Mises, y para la condición de recocido (O) la relación se aproxima más el criterio de Tresca.

Palabras Claves: Comportamiento a torsión, AA6063, Criterios de Fluencia, Precipitación.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>2.1</b>	<b>Etapas del endurecimiento por envejecimiento</b>	<b>23</b>
<b>2.2</b>	<b>Ilustración esquemática de una máquina de ensayos de tracción</b>	<b>24</b>
<b>2.3</b>	<b>Diagrama esfuerzo- deformación ingenieril</b>	<b>25</b>
<b>2.4</b>	<b>Limite elástico y limite de proporcionalidad</b>	<b>27</b>
<b>2.5</b>	<b>Limite de fluencia</b>	<b>27</b>
<b>2.6</b>	<b>Resistencia a la fluencia</b>	<b>28</b>
<b>2.7</b>	<b>Resistencia a la tracción</b>	<b>29</b>
<b>2.8</b>	<b>Diagrama esfuerzo- deformación ingenieril y real</b>	<b>32</b>
<b>2.9</b>	<b>Diagrama de momento torsor vs ángulo de torsión</b>	<b>33</b>
<b>2.10</b>	<b>Probeta de sección circular de radio (R) y longitud (L), sometida a un momento torsor (T)</b>	<b>36</b>
<b>2.11</b>	<b>Comportamiento en la región plástica de la curva momento torsor vs ángulo de deformación</b>	<b>37</b>
<b>2.12</b>	<b>Identador de esfera de acero ó de carburo de tungsteno</b>	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Diagrama de proceso</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>Probeta para ensayo de torsión, todas las medidas en mm</b>	<b>46</b>
<b>3.3</b>	<b>Probeta para ensayo de tracción, todas las medidas en mm</b>	<b>47</b>
<b>3.4</b>	<b>Probeta para ensayo de dureza, todas las medidas en mm</b>	<b>47</b>
<b>3.5</b>	<b>Ciclo térmico del recocido</b>	<b>48</b>
<b>3.6</b>	<b>Ciclo térmico del tratamiento T6</b>	<b>49</b>
<b>3.7</b>	<b>Ciclo térmico del tratamiento T4</b>	<b>49</b>
<b>3.8</b>	<b>Gráfica de carga Vs alargamiento</b>	<b>50</b>
<b>3.9</b>	<b>Gráfica de esfuerzo Vs deformación ingenieril.</b>	<b>52</b>
<b>3.10</b>	<b>Gráfica de momento torsor vs ángulo de deformación</b>	<b>54</b>
<b>3.11</b>	<b>Gráfica de esfuerzo de corte Vs deformación angular</b>	<b>56</b>
<b>3.12</b>	<b>Ubicación del esfuerzo de fluencia</b>	<b>58</b>
<b>3.13</b>	<b>Corte transversal en las probetas de torsión</b>	<b>59</b>
<b>3.14</b>	<b>Horno para tratamientos térmicos</b>	<b>62</b>

<b>3.15</b>	Máquina para ensayo de torsión	<b>63</b>
<b>3.16</b>	Máquina universal para ensayos de tracción	<b>64</b>
<b>3.17</b>	Durómetro digital Rockwell	<b>64</b>
<b>3.18</b>	Durómetro Brinell estándar	<b>65</b>
<b>3.19</b>	Microdurómetro Vickers	<b>65</b>
<b>4.1</b>	Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril de las cuatro (4) probetas de condición de entrega (T5)	<b>68</b>
<b>4.2</b>	Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril de las cuatro (4) probetas en condición de recocido (O)	<b>69</b>
<b>4.3</b>	Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril de las cuatro (4) probetas en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)	<b>70</b>
<b>4.4</b>	Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril de las cuatro (4) probetas en condición de envejecido artificial	<b>71</b>
<b>4.5</b>	Gráfica del ensayo de dureza Brinell estándar en condición de entrega	<b>72</b>
<b>4.6</b>	Gráfica del ensayo de dureza Brinell estándar en condición de recocido (O)	<b>73</b>
<b>4.7</b>	Gráfica del ensayo de dureza en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)	<b>74</b>
<b>4.8</b>	Gráfica del ensayo de dureza Brinell estándar en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)	<b>75</b>
<b>4.9</b>	Gráfica de esfuerzo de corte Vs deformación angular de las siete (7) probetas en condición de entrega T5	<b>76</b>
<b>4.10</b>	Condición de la probeta N° 1 una vez finalizado el ensayo	<b>77</b>
<b>4.11</b>	Gráfica de esfuerzo de corte Vs deformación angular de las siete (7) probetas en condición de recocido	<b>78</b>
<b>4.12</b>	Condición de la probeta N° 1 una vez finalizado el ensayo	<b>78</b>
<b>4.13</b>	Gráfica de esfuerzo de corte Vs deformación angular de las siete (7) probetas en condición de T4	<b>79</b>
<b>4.14</b>	Condición de la probeta N° 1 una vez finalizado el ensayo	<b>80</b>
<b>4.15</b>	Gráfica de esfuerzo de corte Vs deformación angular de las siete (7) probetas en condición de T6	<b>81</b>

<b>4.16</b>	Condición de la probeta N° 1 una vez finalizado el ensayo	<b>81</b>
<b>4.17</b>	Macroscopía a la probeta de torsión en condición de entrega (T5)	<b>83</b>
<b>4.18</b>	Macroscopía a la probeta de torsión en condición de recocido (O)	<b>83</b>
<b>4.19</b>	Macroscopía a la probeta de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)	<b>84</b>
<b>4.20</b>	Macroscopía a la probeta de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6).	<b>85</b>
<b>4.21</b>	Microscopía a la probeta de torsión en condición de entrega (T5), a) 20X y b) 40X.	<b>86</b>
<b>4.22</b>	Medición de área porcentual de las fases para la condición de T5.	<b>86</b>
<b>4.23</b>	Microscopía a la probeta de torsión en condición de recocido (O), a) 20X y b) 40X.	<b>87</b>
<b>4.24</b>	Microscopía a la probeta de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4), a) 20X y b) 40X.	<b>88</b>
<b>4.25</b>	Microscopía a la probeta de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6), a) 20X y b) 40X.	<b>89</b>
<b>5.1</b>	Gráfica de esfuerzo vs deformación típicas para cada condición de tratamiento térmico.	<b>96</b>
<b>5.2</b>	Comportamiento de las propiedades mecánicas y la ductilidad del material de acuerdo al tratamiento térmico aplicado	<b>97</b>
<b>5.3</b>	Comportamiento de la dureza de acuerdo al tratamiento térmico aplicado	<b>98</b>
<b>5.4</b>	Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular típicas para cada condición de tratamiento térmico	<b>106</b>
<b>5.5</b>	Comportamiento de las propiedades mecánicas y el coeficiente de endurecimiento por deformación para cada condición de la aleación	<b>107</b>
<b>5.6</b>	Influencia de los tratamientos térmicos en la microestructura y la dureza del material	<b>113</b>
<b>5.7</b>	Comportamiento de las fases presentes en la aleación de acuerdo al tratamiento térmico aplicado	<b>114</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>2.1</b>	Grupos de aleaciones de aluminio forjado	<b>17</b>
<b>2.2</b>	Propiedades del aluminio 6063- recocido (O)	<b>20</b>
<b>2.3</b>	Propiedades del aluminio 6063- envejecimiento natural (T4)	<b>20</b>
<b>2.4</b>	Propiedades del aluminio 6063- envejecimiento artificial (T6)	<b>20</b>
<b>2.5</b>	Composición química (%) de la aleación AA6063	<b>21</b>
<b>3.1</b>	Composición química única del AA6063 utilizada en los ensayos	<b>46</b>
<b>3.2</b>	Muestra de los ensayos	<b>61</b>
<b>3.3</b>	Especificaciones del horno eléctrico	<b>63</b>
<b>3.5</b>	Especificaciones del microdurómetro BUEHLER	<b>66</b>
<b>4.1</b>	Composición química según las especificaciones reales de la aleación del aluminio 6063	<b>67</b>
<b>4.2</b>	Resumen de las propiedades obtenidas de la gráfica esfuerzo vs deformación ingenieril para las cuatro (4) probetas en condición de entrega	<b>68</b>
<b>4.3</b>	Resumen de las propiedades obtenidas de la gráfica esfuerzo vs deformación ingenieril para las cuatro (4) probetas en condición de recocido (O)	<b>69</b>
<b>4.4</b>	Resumen de las propiedades obtenidas de la gráfica esfuerzo vs deformación ingenieril para las cuatro (4) probetas en condición endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)	<b>70</b>
<b>4.5</b>	Resumen de las propiedades obtenidas de la gráfica esfuerzo vs deformación ingenieril para las cuatro (4) probetas en condición endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)	<b>71</b>
<b>4.6</b>	Resultados del ensayo de dureza Brinell estándar (HBN) para la condición de entrega (T5).	<b>72</b>
<b>4.7</b>	Resultados del ensayo de dureza Brinell estándar para la condición de recocido (O)	<b>73</b>
<b>4.8</b>	Resultados del ensayo de dureza superficial Rockwell (15-T) para la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)	<b>74</b>

<b>4.9</b>	Resultados del ensayo de dureza superficial Rockwell (15-T) para la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)	<b>75</b>
<b>4.10</b>	Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de torsión en condición de entrega (T5)	<b>76</b>
<b>4.11</b>	Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de torsión en condición de recocido (O)	<b>77</b>
<b>4.12</b>	Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)	<b>79</b>
<b>4.13</b>	Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)	<b>80</b>
<b>4.14</b>	Resumen de valores obtenidos para los ensayos de tracción y torsión	<b>82</b>
<b>4.15</b>	Relaciones entre el esfuerzo de fluencia en tracción y torsión de la aleación de aluminio AA6063	<b>82</b>
<b>4.16</b>	Valores del área porcentual de las fases de la probeta en condición de tratamiento térmico de entrega (T5)	<b>87</b>
<b>4.17</b>	Valores del área porcentual de las fases de la probeta en condición de tratamiento térmico de recocido (O)	<b>88</b>
<b>4.18</b>	Valores del área porcentual de las fases de la probeta en condición de tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)	<b>89</b>
<b>4.19</b>	Valores del área porcentual de las fases de la probeta en condición de tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)	<b>89</b>
<b>4.20</b>	Resumen de los valores de microdureza obtenidos de los precipitados en cada condición de tratamiento térmico	<b>90</b>
<b>4.21</b>	Resumen de los valores de microdureza obtenidos de la matriz aluminio en cada condición de tratamiento térmico.	<b>90</b>
<b>5.1</b>	Composición química de la aleación AA6063 según la norma ASTM.	<b>91</b>
<b>5.2</b>	Comparación de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción para condición de entrega	<b>92</b>
<b>5.3</b>	Comparación de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción para la condición de recocido (O)	<b>93</b>
<b>5.4</b>	Comparación de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción para la	<b>94</b>

	condición de T4.	
<b>5.5</b>	Comparación de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción para la condición de T6	<b>95</b>
<b>5.6</b>	Resumen de resultados de dureza Brinell estándar aleación de aluminio AA6063	<b>98</b>
<b>5.7</b>	Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en condición de entrega (T5)	<b>100</b>
<b>5.8</b>	Comparación de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en condición de entrega (T5)	<b>100</b>
<b>5.9</b>	Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en condición de recocido (O)	<b>101</b>
<b>5.10</b>	Comparación de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en condición de recocido (O)	<b>102</b>
<b>5.11</b>	Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)	<b>103</b>
<b>5.12</b>	Comparación de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)	<b>103</b>
<b>5.13</b>	Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)	<b>104</b>
<b>5.14</b>	Comparación de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)	<b>105</b>
<b>5.15</b>	Comparación de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión para cada condición de tratamiento térmico	<b>106</b>
<b>5.16</b>	Errores de las relaciones entre el esfuerzo de fluencia a tracción y a torsión de la aleación de aluminio AA6063 respecto a los criterios de fluencia	<b>108</b>



# ÍNDICE GENERAL

<b>INTRODUCCIÓN</b>		<b>1</b>
	<b>CAPÍTULO I</b>	<b>El Problema</b>
<b>1.1</b>	Situación problemática	<b>3</b>
<b>1.2</b>	Objetivos	<b>4</b>
<b>1.2.1</b>	Objetivo general	<b>4</b>
<b>1.2.2</b>	Objetivos específicos	<b>5</b>
<b>1.3</b>	Justificación de la investigación	<b>5</b>
<b>1.4</b>	Alcance	<b>6</b>
<b>1.5</b>	Limitaciones	<b>6</b>
<b>1.6</b>	Antecedentes	<b>7</b>
<b>1.6.1</b>	Antecedente N°1	<b>7</b>
<b>1.6.2</b>	Antecedente N°2	<b>8</b>
<b>1.6.3</b>	Antecedente N°3	<b>9</b>
<b>1.6.4</b>	Antecedente N°4	<b>9</b>
<b>1.6.5</b>	Antecedente N°5	<b>10</b>
<b>1.6.6</b>	Antecedente N°6	<b>11</b>
<b>1.6.7</b>	Antecedente N°7	<b>12</b>
<b>1.6.8</b>	Antecedente N°8	<b>12</b>
	<b>CAPÍTULO II</b>	<b>Marco Teórico</b>
<b>2.1</b>	Marco teórico	<b>15</b>
<b>2.1.1</b>	Generalidades	<b>15</b>
<b>2.1.1.1</b>	Aluminio	<b>15</b>
<b>2.1.1.2</b>	Producción del aluminio	<b>16</b>
<b>2.1.2</b>	Aleaciones de aluminio	<b>16</b>
<b>2.1.2.1</b>	Aleaciones de aluminio forjado	<b>16</b>
<b>2.1.2.2</b>	Designación del templado	<b>17</b>

2.1.2.3	Aleaciones de fundición de aluminio	18
2.1.3	Aleación de aluminio 6063	18
2.1.3.1	Propiedades físicas	19
2.1.3.2	Propiedades mecánicas	19
2.2.3.3	Composición química	21
2.1.4	Tratamientos térmicos	21
2.1.4.1	Recocido	21
2.1.4.2	Tratamiento térmico de la solución	22
2.1.4.3	Tratamientos de precipitación	22
2.1.5	Esfuerzo y deformación en metales	23
2.1.5.1	Deformación elástica y plástica	23
2.1.5.2	Comportamiento mecánico a tracción	23
2.1.5.3	Esfuerzo real y deformación real	31
2.1.6	Comportamiento mecánico a torsión	32
2.1.6.1	Ensayo de torsión	32
2.1.6.2	Diagrama de momento torsor y ángulo de torsión	33
2.1.6.3	Definición de esfuerzo cortante y distorsión angular	34
2.1.6.4	Esfuerzos para grandes deformaciones	36
2.1.7	Dureza y ensayo de dureza	39
2.1.7.1	Ensayo Brinell	39
2.1.7.2	Ensayo Rockwell	40
2.1.8	Microdureza	40
2.1.9	Criterios de fluencia	40
2.1.9.1	Criterio de la máxima tensión de corte	41
2.1.9.2	Criterio de falla de la máxima energía de distorsión	42

### **CAPÍTULO III      Marco Metodológico**

3.1	Diseño de la investigación	45
3.1.1	Adquisición del material	46

<b>3.1.2</b>	<b>Elaboración de las probetas</b>	<b>46</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Aplicación de tratamientos térmicos</b>	<b>47</b>
<b>3.1.3.1</b>	<b>Recocido (O)</b>	<b>48</b>
<b>3.1.3.2</b>	<b>Endurecimiento por precipitación y env. natural (T4)</b>	<b>48</b>
<b>3.1.3.3</b>	<b>Endurecimiento por precipitación y env. artificial (T6)</b>	<b>49</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Ensayos mecánicos</b>	<b>50</b>
<b>3.1.4.1</b>	<b>Ensayos de tracción</b>	<b>50</b>
<b>3.1.4.2</b>	<b>Ensayos de torsión</b>	<b>53</b>
<b>3.1.4.3</b>	<b>Ensayos de dureza</b>	<b>58</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Macroscopía</b>	<b>59</b>
<b>3.1.6</b>	<b>Microscopía óptica</b>	<b>60</b>
<b>3.1.7</b>	<b>Medición de la microdureza de las fases presentes en la aleación</b>	<b>60</b>
<b>3.2</b>	<b>Muestras</b>	<b>61</b>
<b>3.3</b>	<b>Método de recolección de datos</b>	<b>62</b>
<b>3.4</b>	<b>Instrumentos de recolección de datos</b>	<b>62</b>

## **CAPÍTULO IV      Resultados Obtenidos**

<b>4.1</b>	<b>Resultados de la composición del aluminio 6063</b>	<b>67</b>
<b>4.2</b>	<b>Resultados de los ensayos de tracción</b>	<b>67</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Resultados de los ensayos de tracción en condición de entrega (T5)</b>	<b>68</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Resultados de los ensayos de tracción en condición de recocido (O)</b>	<b>69</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Resultados de los ensayos de tracción para el tratamiento de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)</b>	<b>79</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Resultados de los ensayos de tracción para el tratamiento de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)</b>	<b>71</b>

<b>4.3</b>	<b>Resultados de los Ensayos de Dureza</b>	<b>72</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Resultados del ensayo de dureza en condición de entrega (T5)</b>	<b>72</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Resultados del ensayo de dureza en condición de recocido (O)</b>	<b>73</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Resultados de los ensayos de dureza para el tratamiento de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)</b>	<b>73</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Resultados de los ensayos de dureza para el tratamiento de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)</b>	<b>74</b>
<b>4.4</b>	<b>Resultados de los ensayos de torsión</b>	<b>75</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Resultados del ensayo de torsión en condición de entrega (T5)</b>	<b>76</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Resultados del ensayo de torsión en condición de recocido (O)</b>	<b>77</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Resultados de los ensayos de torsión para el tratamiento de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)</b>	<b>78</b>
<b>4.4.4</b>	<b>Resultados de los ensayos de torsión para el tratamiento de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)</b>	<b>80</b>
<b>4.5</b>	<b>Aplicación de las relaciones entre las propiedades a tracción y torsión</b>	<b>81</b>
<b>4.6</b>	<b>Macroscopía a muestras provenientes del ensayo de torsión</b>	<b>82</b>
<b>4.6.1</b>	<b>Macroscopía a las muestras en condición de entrega (T5)</b>	<b>82</b>
<b>4.6.2</b>	<b>Macroscopía a las muestras en condición de recocido (O)</b>	<b>83</b>
<b>4.6.3</b>	<b>Macroscopía a las muestras en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)</b>	<b>84</b>
<b>4.6.4</b>	<b>Macroscopía a las muestras en condición de endurecimiento</b>	<b>84</b>

	por precipitación y envejecimiento artificial (T6)	
<b>4.7</b>	Microscopía a muestras provenientes del ensayo de torsión	<b>85</b>
<b>4.7.1</b>	Microscopía a las muestras en condición de entrega (T5)	<b>86</b>
<b>4.7.2</b>	Microscopía a las muestras en condición de recocido (O)	<b>87</b>
<b>4.7.3</b>	Microscopía a las muestras en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)	<b>88</b>
<b>4.7.4</b>	Microscopía a las muestras en condición de Endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)	<b>89</b>
<b>4.8</b>	Medición de microdureza de las fases presentes en la aleación AA6063	<b>90</b>

## **CAPÍTULO V      Análisis de Resultados**

<b>5.1</b>	Resultados de la composición química de la aleación de aluminio AA6063	<b>91</b>
<b>5.2</b>	Ensayo de tracción	<b>92</b>
<b>5.3</b>	Ensayo de Dureza	<b>98</b>
<b>5.4</b>	Ensayo de Torsión	<b>99</b>
<b>5.5</b>	Relación entre las propiedades obtenida de los Ensayos de tracción y torsión.	<b>107</b>
<b>5.6</b>	Evaluación macroscópica de la aleacion de aluminio AA6063	<b>108</b>
<b>5.7</b>	Evaluacion microscópica de la aleacion de aluminio AA6063	<b>110</b>
<b>5.8</b>	Medición de microdureza de las fases presentes en la aleación AA6063	<b>113</b>
<b>5.9</b>	Relación entre las propiedades a tracción, torsión y dureza con la evaluación microscópica y los tratamientos térmicos aplicados.	<b>114</b>
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>117</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>119</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>121</b>

## **ANEXOS**

Certificado de la composición química de la aleación de aluminio AA6063	<b>1</b>
Curvas de carga vs. Alargamiento para la condición de Entrega	<b>2-5</b>
Curvas de carga vs. Alargamiento para la condición de Recocido	<b>6-9</b>
Curvas de carga vs. Alargamiento para la condición de T4	<b>10-13</b>
Curvas de carga vs. Alargamiento para la condición de T6	<b>14-17</b>

## INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio tienen una combinación de propiedades que las hacen sumamente útil como material de ingeniería. El aluminio posee una densidad relativamente baja, así como una buena resistencia a la corrosión, lo que lo hace particularmente útil para productos manufacturados para el transporte, además posee un precio relativamente bajo en comparación con los demás materiales presentes en el mercado y sus propiedades lo hacen muy útil a nivel industrial.

La aleación de aluminio 6063 se destaca por su ligereza, así como por su elevada conductividad térmica y eléctrica. Este aluminio pertenece al grupo de aleaciones Al – Mg – Si de la serie 6XXX, las cuales presentan porcentajes de magnesio y silicio inferiores a 1%. Esta aleación de aluminio es considerada generalmente una aleación extruible y tratable térmicamente para aumentar su resistencia mecánica, con una maquinabilidad media, capacidad de conformado tanto en frío como en caliente, así como también es fácilmente soldable por cualquiera de los métodos tradicionales, además posee una excelente resistencia a la corrosión en los diversos ambientes naturales.

Las propiedades mecánicas a tracción de esta aleación han sido estudiadas ampliamente, sin embargo este hecho a traído como consecuencia que las propiedades mecánicas a torsión hayan sido poco estudiadas, ya que al tener los valores a tracción empleando los criterios de fluencia consiguen los valores a corte; el objetivo general de este trabajo es obtener los valores de las propiedades mecánicas a torsión de manera experimental mediante la realización de ensayos de torsión. De igual manera se realizarán los ensayos de tracción para comparar mediante los criterios de fluencia la relación existente entre dichas propiedades y los valores a torsión.

En esta investigación se estudiará la aleación de aluminio 6063 tanto en condición de entrega (T5), así como en tres condiciones de tratamiento térmico, recocido (O), endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4) y endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6), siendo éstos los tratamientos térmicos más comunes en los cuales se presenta dicha aleación.

También los ensayos de dureza para caracterizar el material y así verificar que la aplicación de los tratamientos térmicos ha sido correcta. Además se realizarán estudios de microscopía y macroscopía a las probetas provenientes de los ensayos de torsión de manera de caracterizar a las mismas en dicha condición. Por último se realizaran mediciones de microdureza de las fases presentes en la aleación, dichas fases serán reveladas en la microscopía anteriormente mencionada.

# CAPÍTULO 1

## *El Problema*

---

---

### **1.1 Situación Problemática**

Hoy en día los procesos de fabricación en los cuales se somete a los materiales a distintas condiciones cada vez más exigentes, conlleva, a tener un conocimiento más amplio y confiable del comportamiento de las propiedades mecánicas de los mismos para así poder utilizarlos de manera segura en una determinada aplicación.

El aluminio es un material que tiene una combinación de propiedades que lo hacen sumamente útil como material de ingeniería y aunque en su estado de pureza posee baja resistencia, mediante sus aleaciones constituidas a base de éste y elementos tales como magnesio, silicio, entre otros, y por tratamientos térmicos aplicables, este material puede adquirir una resistencia mayor.

La aleación de aluminio AA6063 en la mayoría de sus presentaciones, viene acompañada de un tratamiento térmico, debido a que pertenece al grupo de aleaciones de aluminio térmicamente tratables, lo cual la hace muy versátil para diversas aplicaciones industriales. Las aplicaciones principales de esta aleación de aluminio son para la extrusión de perfiles arquitectónicos, torres de andamios para trabajar en las alturas, carcasa para motores eléctricos, sistemas de ensamblado, elementos especiales

para maquinaria, puertas, ventanas, tubos de riego, instalaciones neumáticas, pasamanos de escaleras, barandas tubulares y uniones soldadas, en las cuales hay que aplicar ensayos de torsión para medir la resistencia de la soldadura, entre otros; es por ello que es de gran relevancia el conocimiento de las propiedades de esta aleación tratada térmicamente.

Estas propiedades se pueden obtener mediante un ensayo de tracción comúnmente empleado para ello, sin embargo, también se pueden aplicar ensayos de torsión para predecir el comportamiento de esta aleación cuando es sometida a esa condición, lo cual sería de gran utilidad debido a que existen diversas aplicaciones como las mencionadas anteriormente, en las cuales, este material es sometido a torsión sin tener un conocimiento previo de las propiedades del mismo en dichas condiciones.

Los resultados que se obtienen al realizar estos ensayos de torsión han sido poco estudiados por investigadores del área de ingeniería mecánica, debido a que muchas de las propiedades mecánicas allí obtenidas se pueden determinar por medio de ensayos de tracción a través de la aplicación de criterios de fluencia tales como: el de tensión cortante máxima de Tresca y el de energía máxima de deformación cortante de Von Mises, sin embargo, a lo que se quiere llegar con esta investigación, es a obtener las propiedades mecánicas de esta aleación de aluminio aplicando este tipo de ensayos, y luego, realizar el respectivo análisis comparativo, y además, evaluar la influencia de cada uno de los tratamientos térmicos en los cuales se presenta dicha aleación, y así poder establecer diferencias entre este tipo de aleaciones tratadas térmicamente de acuerdo a aplicaciones de la misma.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Evaluar el comportamiento a torsión de la aleación AA6063 tratada térmicamente.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades mecánicas a tracción de la aleación de aluminio AA6063 tratada térmicamente.
- Determinar las propiedades mecánicas a torsión de la aleación de aluminio AA6063 tratada térmicamente.
- Obtener la variación de dureza en muestras de la aleación de aluminio AA6063 tratada térmicamente.
- Analizar mediante microscopía óptica y macroscopía las muestras de la aleación AA6063 ensayadas a torsión.
- Hallar la relación entre las propiedades a tracción, torsión y dureza para muestras ensayadas con diferentes tratamientos térmicos.

### 1.3 Justificación

La importancia radica en que la aleación AA6063 posee escasos registros de sus propiedades mecánicas a torsión, existiendo poca bibliografía y estudios realizados de la misma en esa condición, encontrándose solamente registrada su composición química y las propiedades mecánicas a tracción.

Con la presente investigación se logrará evaluar el comportamiento mecánico de la aleación AA6063 tratada térmicamente cuando es sometida a torsión en frío, además de realizar comparaciones entre estas y las propiedades a tracción, así como, la variación de ellas y su dureza con respecto a cada tratamiento térmico aplicado, con esto lo que se quiere es suministrar una base de datos útil para trabajos posteriores en el área, de manera que al momento de utilizar la aleación para alguna de sus aplicaciones, se emplee de una manera segura y con el conocimiento del respectivo tratamiento térmico recomendado para un uso específico, lo cual, también tendría un

beneficio en cuanto a los costos de inversión, Para así poder ampliar el uso del producto en el área industrial.

Además un conocimiento amplio del comportamiento mecánico a torsión y a tracción de esta aleación tratada térmicamente, se traduciría en seguridad y confianza al momento de decidir utilizar este material en alguna aplicación en específico, lo cual disminuye de manera significativa los riesgos de fallas a futuro.

Esta investigación contribuye con la tendencia de la línea de investigación de comportamiento mecánico de los materiales del departamento de materiales y procesos de fabricación, de estudiar este material y obtener una amplia base de datos que facilite el uso de este material en diversas aplicaciones.

#### **1.4 Alcance**

- Los ensayos de tracción (4 ensayos por cada condición), torsión (7 ensayos por cada condición) y dureza (2 ensayos con 9 indentaciones por cada condición) se aplicarán sólo a probetas de la aleación de aluminio AA6063, debido a que esta es la aleación en estudio.
- El análisis macroscópico y microscópico se realizará solo a probetas provenientes del ensayo de torsión, ya que en esta condición se desconoce el comportamiento de la aleación.
- Los ensayos se realizarán a la aleación de aluminio AA6063, en condiciones de entrega (T5) y para tres tratamientos térmicos, 0, T4, y T6, siendo estos los más utilizados para aleaciones de aluminio.

#### **1.5 Limitaciones**

- La disponibilidad horaria y humana del Laboratorio de Materiales de la escuela de Ingeniería Mecánica.

- Disponibilidad de las máquinas para realizar los ensayos, y del horno para realizar los tratamientos térmicos respectivos.
- Escases de referencias bibliográficas acerca de la aleación de aluminio AA6063 sometida a torsión.

## 1.6 Antecedentes

### 1.6.1 Antecedente N°1:

Pereira, et al. (2009). “*Comportamiento mecánico a torsión de la aleación de aluminio AA6061 tratada térmicamente*”. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. S1(1): 183-190

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el comportamiento mecánico a torsión de la aleación de aluminio AA6061 con diferentes tratamientos térmicos. Para llevar a cabo este trabajo fue necesario determinar las propiedades mecánicas a tracción, torsión, así como la variación de dureza para cada tratamiento térmico aplicado, siendo éstos los tratamientos térmicos de recocido (O), envejecimiento natural (T4), y envejecimiento artificial (T6). Los ensayos de torsión se llevaron a cabo en la máquina para ensayos de torsión del Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo; las probetas ensayadas a torsión fueron macizas con una sección transversal circular en el área de prueba y con extremos cuadrados para la sujeción en la máquina, la velocidad de ensayo se mantuvo constante en una revolución por minuto, a partir de estos ensayos se obtuvieron las curvas esfuerzo al corte versus deformación angular en torsión, para cada condición de tratamiento térmico. Las propiedades obtenidas del ensayo de torsión fueron influenciadas de manera significativa por la aplicación de los tratamientos térmicos aplicados, produciendo un aumento tanto del esfuerzo de fluencia al corte como del esfuerzo último al corte, además, una disminución de la ductilidad del material.

Se realizó también la caracterización microestructural de las muestras, y una vez realizados los ensayos de tracción y de torsión, se determinaron las relaciones entre los resultados obtenidos de ambos ensayos, obteniendo así la relación experimental entre el esfuerzo de fluencia a tracción y el esfuerzo de fluencia al corte en torsión, relación que disminuye en magnitud con la aplicación de los tratamientos térmicos de endurecimiento. Esta relación fue comparada con los criterios teóricos de fluencia de Von Mises y de Tresca, comprobando que el criterio de Von Mises se acerca más a los datos obtenidos experimentalmente que el criterio de Tresca, siendo para la condición de recocido donde se verificó la menor diferencia entre los resultados experimentales y los teóricos.

### **1.6.2 Antecedente N°2:**

Divo, J. y Kirhhof, R. (2006). “*Construction and validation test of a torsion test machine*”. Journal of Materials Processing Technology. CLXXIX, 23 - 29

En esta investigación se describió el uso y ensayo de un prototipo de máquina para realizar ensayos de torsión. Aparte de construir la máquina para el ensayo, también se realizaron pruebas en diversos materiales tales como acero 1020, aluminio y bronce. En parte de su estudio experimental se obtuvo la curva de momento torsor, límite de fluencia al corte versus la deformación angular para todos y cada uno de los materiales antes mencionados, además entre sus conclusiones de mayor relevancia esta que para el aluminio ensayado las propiedades mecánicas decayeron de manera importante para un ángulo de torsión de 200° aproximadamente, también demostraron que los valores característicos de la zona plástica del material varían de acuerdo a la deformación angular.

### 1.6.3 Antecedente N°3:

Totik, et al. (2004). “*The effect of homogenisation treatment on cold deformations of AA 2014 and AA 6063 alloys*”. Journal of Materials Processing Technology. 147 (2004) 60–64

En esta investigación, se evaluó el efecto de la homogenización en las aleaciones de aluminio AA2014 y AA6063 deformadas en frío, este estudio se realizó mediante ensayos de torsión. Las aleaciones fueron homogeneizadas a unas temperaturas de 320,370, 420 y 470 °C en un tiempo de 8 horas. La dureza fue medida en escala Vickers y la microestructura fue estudiada empleando un microscopio electrónico de barrido y mediante rayos x, en donde se observó que el tratamiento térmico afectó de manera significativa la microestructura del material. Una de sus conclusiones más relevantes fue que el tratamiento térmico de homogeneizado mejora el grado de deformación en frío, dependiendo del tipo de aleación y de la temperatura de homogeneizado.

### 1.6.4 Antecedente N°4:

Di Simone, F. y Puchi, E. “*Recocido isotérmico de una aleación comercial de aluminio-1% manganeso proveniente de colada continua de doble rodillo deformada en frío*”. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Se ha llevado un estudio sobre la evolución microestructural y la cinética de restauración de una aleación comercial de Aluminio-1%Manganeso (AA3003), deformada bajo condiciones de trabajo en frío. El material proveniente de colada continua de doble rodillo fue sometido a una reducción de espesor del 50% y luego se le aplicó un tratamiento de homogeneización a 590° C durante 8 horas, previo a una reducción de espesor única del 50%. Las muestras fueron posteriormente recocidas a 350° y 450°C durante tiempos de recocido que variaron entre 5 y 48.000 segundos.

La respuesta de la aleación al recocido fue estudiada por medio de ensayos mecánicos y microscopía óptica. Se encontró un bajo valor de la energía de activación posiblemente debido al efecto del proceso de homogeneización en la promoción de una estructura de partículas de fase secundaria y posterior formación mecánica de prenúcleos de recristalización alrededor de dichas partículas. La determinación de la fracción restaurada corregida por recuperación permitió revelar la notable influencia de la recuperación en la restauración de las propiedades mecánicas del material así como una confiable descripción del proceso de recristalización. En cuanto a la evolución microestructural se corroboró la disminución del tamaño de grano con la temperatura de recocido. También se observó la heterogeneidad en cuanto a forma y tamaño de grano recristalizado final de la aleación.

#### **1.6.5 Antecedente N°5:**

Cabello, et al. (2009) *“Ensayos de compresión y torsión: Una alternativa en la obtención de curvas Esfuerzo-Deformación Efectiva de materiales metálicos dúctiles”*. XIBEROMET 2008. Cartagena de Indias, Colombia.

En esta investigación se propone una alternativa para la obtención experimental del comportamiento de materiales metálicos dúctiles, usados en el conformado volumétrico; donde las grandes deformaciones están presentes. Para ello se sugiere el uso de ensayos mecánicos no convencionales como: compresión cilíndrica, compresión plana y torsión. Es conocido, que el espectro de deformaciones reproducibles por ensayos de torsión es mayor que el logrado mediante ensayos de compresión. No obstante, es más frecuente la disposición de equipos universales de tracción que permiten hacer indistintamente ensayos de naturaleza compresiva o de tracción. Por otra parte y, salvo las objeciones que a lo largo de años se han hecho a los ensayos de compresión cilíndrica (debido a los efectos de pandeo y abarillamiento); la fabricación de muestras requeridas para ensayos de compresión son menos exigentes; en cuanto a forma y tamaño, que las normalizadas para pruebas de tracción ó torsión. Además, el desconocimiento de la influencia de fricción sobre la

relación esfuerzo-deformación y los modos de cuantificar tal efecto, ha sido la causa de que los ensayos de compresión no hayan sido considerados como herramientas válidas en la determinación del comportamiento de los metales en la zona de deformaciones plásticas considerables. En el desarrollo de la investigación, se incorpora una metodología para corregir los esfuerzos determinados mediante ensayos de compresión a causa de la fricción generada entre la muestra y los platos compresores; tanto para compresión plana como cilíndrica, así como también las correcciones de esfuerzos por efecto de la formación del cuello durante ensayos de tracción. Finalmente se presenta, partiendo de los criterios de fluencia para materiales dúctiles, una equivalencia entre los cuatro estados de esfuerzos presentes en cada ensayo (tracción, compresión cilíndrica, compresión plana y torsión) con la intención de determinar el comportamiento plástico del material metálico, en términos de la curva esfuerzo-deformación efectiva, la cual constituye la base para la modelar dicho comportamiento mediante ecuaciones constitutivas.

#### **1.6.6 Antecedente N°6:**

Palkovic, E. y Sánez, F. (2006). “*Diseño y construcción de una máquina para realizar ensayos de torsión*”. Trabajo de grado no publicado, Universidad de Carabobo, Valencia.

El objetivo de este trabajo fue diseñar y construir una máquina para realizar ensayos de torsión en ejes cilíndricos macizos, de aluminio, de bronce y latón. Para ello fue necesario cumplir con varios aspectos propuestos, tales como: recolección de bibliografía, formulaciones de hipótesis, evaluaciones de posibles soluciones, diseño y selección de los elementos necesarios así como la fabricación de la máquina y el desarrollo de un manual de uso y mantenimiento de la misma. Como parte del trabajo se realizaron ensayos demostrativos con la máquina de ensayo de torsión construida y se puede apreciar la grafica del momento torsor vs el ángulo de giro de la probeta que la misma máquina proporciona luego de realizado el ensayo.

**1.6.7 Antecedente N°7:**

Durán, C. y Hernández, N. (2007). *“Efecto del tratamiento térmico de envejecimiento, aplicado a una aleación de aluminio AA6061 sobre sus propiedades mecánicas”*. Trabajo de grado no publicado. Universidad de Carabobo, Valencia.

El objetivo de esta investigación fue estudiar el efecto que tiene el tratamiento térmico de envejecimiento aplicado al material AA6061 sobre sus propiedades mecánicas, se partió de barras cilíndricas de ½” de diámetro. La misma se mecanizó para obtener las probetas, tratarlas térmicamente y realizar los ensayos según normas. Se trabajó la aleación con seis condiciones, la condición original, solubilizada con un tiempo de dos horas a 533°C, y cuatro tiempos de envejecimiento de 1, 3, 6 y 9 horas a 177 °C. Estas condiciones fueron estudiadas y analizadas mediante ensayos de tracción, Charpy y dureza y además se evaluó la microscopía del material y la fractografía.

Finalmente obtenidos los resultados de los ensayos, se determinaron los esfuerzos de fluencia, máximo y de ruptura, dureza, ductilidad y tenacidad al impacto. Se evidenció que el material se hace altamente dúctil en un corto tiempo de permanencia en el horno y el mismo tiende a aumentar su fragilidad, a medida que este tiempo es mayor. La conclusión más importante es que se comprobó que mientras mayor es el tiempo de estudio de envejecimiento, el material tiende a aumentar sus propiedades mecánicas.

**1.6.8 Antecedente N°8:**

Nassinia, et al. (2000). *“Efecto de tratamientos térmicos post-síntesis sobre Las propiedades mecánicas de materiales compuestos De matriz metálica”*. Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de fractura y fatiga.

Las propiedades mecánicas globales de los materiales compuestos de matriz metálica (MMC) dependen tanto de las propiedades de los constituyentes (refuerzo y matriz) como de las características de la interfase entre ambos. Para aleaciones de

aluminio endurecibles por precipitación, las propiedades mecánicas de la matriz pueden optimizarse mediante tratamientos térmicos (TT) de envejecimiento artificial (a temperaturas entre 150 y 200 °C), mientras que la resistencia interfacial depende principalmente de reacciones químicas entre el refuerzo y la matriz, las que ocurren a altas temperaturas (500 °C).

En el presente trabajo se investigó el efecto de diferentes TT ‘post-síntesis’ sobre algunas propiedades mecánicas de una aleación de pistón (AlSi12CuMgNi), reforzada con ~9.6 vol.% de fibras cortas de alúmina (“Saffil”, ICI). Las propiedades que se evaluaron fueron la resistencia a la tracción, la resistencia a la flexión en 4 puntos y la dureza, mientras que las muestras ensayadas fueron sometidas a 2 tipos de TT: (1) solubilización (515 °C, 14 horas); (b) envejecimiento artificial (200 °C y tiempos de exposición variables), para encontrar las condiciones de máximo endurecimiento de la matriz (‘peak aging’). El TT a alta temperatura no modificó apreciablemente las propiedades mecánicas del compuesto, aunque sí cambió el modo de fractura en tracción, mientras que los subsiguientes TT de envejecimiento incrementaron en más del 20 % la tensión de rotura del MMC, respecto del material sin tratar. Las condiciones de máximo endurecimiento se alcanzaron en tiempos mucho más cortos que los correspondientes a la aleación sin reforzar.



# CAPÍTULO 2

## *Marco Teórico*

---

---

### **2.1 Marco Teórico**

#### **2.1.1 Generalidades**

##### 2.1.1.1 Aluminio

El aluminio tiene una combinación de propiedades que lo hacen sumamente útil como material de ingeniería. El aluminio tiene una densidad baja ( $2,70 \text{ g/cm}^3$ ), que lo hace particularmente útil para productos manufacturados para el transporte. El aluminio tiene también buena resistencia a la corrosión en la mayoría de los ambientes naturales, debido a la película de óxido tenaz que se forma en su superficie. Aunque el aluminio puro tiene baja resistencia, mediante sus aleaciones puede adquirir una resistencia aproximada de 100 ksi (690 MPa). El aluminio no es tóxico y se usa ampliamente en recipientes y envases para alimentos. Las buenas propiedades eléctricas del aluminio lo hacen adecuado para muchas aplicaciones en la industria eléctrica. El precio relativamente bajo del aluminio junto con sus muchas propiedades útiles hace que sea muy importante a nivel industrial. [18]

### 2.1.1.2 Producción del aluminio

El aluminio es el elemento metálico más abundante en la superficie de la tierra y siempre se presenta combinado con otros elementos, como hierro, oxígeno y silicio. La bauxita formada principalmente por óxidos de aluminio hidratados es el mineral comercial más importante que se usa para producir aluminio. [18]

### 2.1.2 Aleaciones de aluminio

El aluminio y sus aleaciones se dividen en tres amplias clases: lingotes para el refundido, formas vaciadas y productos trabajados mecánicamente (forjados). La última clase se divide en aleaciones endurecidas por el trabajo (no aptas para tratamiento térmico) y aleaciones que se someten a tratamiento térmico, además de las diversas formas producidas mediante el trabajo mecánico, en particular el material relaminado, placas, hojas. Barras, extrusiones, secciones huecas, material para forjar, tubos, entre otros.

Los elementos aleantes principales del aluminio son: cobre (Cu), silicio (Si), magnesio (Mg), zinc (Zn) y manganeso (Mn) y en menores cantidades existen, impurezas o aditivos tales como: hierro (Fe), cromo (Cr) y titanio (Ti). [18]

#### 2.1.2.1 Aleaciones de aluminio forjado

Las aleaciones de aluminio producidas en forma forjada, se clasifican de acuerdo con los principales elementos con los que están aleados. Para identificar a las aleaciones forjadas de aluminio se utiliza una clave numérica de cuatro dígitos. El primer dígito indica el grupo de la aleación que contiene elementos aleados específicos. Los dos últimos dígitos identifican a la aleación de aluminio o indican su impureza. El segundo dígito indica la modificación de la aleación original o los límites de su impureza. En la tabla 2.1 se presenta la lista de los grupos de aleaciones de aluminio forjado.

**Tabla 2.1** Grupos de aleaciones de aluminio forjado.

Aluminio, 99% como mínimo o más	1xxx
Cobre	2xxx
Manganeso	3xxx
Silicio	4xxx
Magnesio	5xxx
Magnesio- Silicio	6xxx
Zinc	7xxx
Otros elementos	8xxx
Series no utilizadas	9xxx

Fuente: W. Smith.

#### 2.1.2.2 Designación del templado

Las notaciones del templado para las aleaciones de aluminio forjado siguen el sistema usado para designar a la aleaciones y están separadas por un guión (por ejemplo, 1100-O). Las subdivisiones de un templado básico se indican mediante uno o varios dígitos a los que le sigue la letra de la designación básica (por ejemplo, 6063-T5). A continuación se presentan las notaciones básicas del templado:

- **F**- Estado inicial de fabricación. No hay control de la cantidad de endurecimiento; no hay límites en cuanto a las propiedades mecánicas.
- **O**- Recocido y recristalizado. Templado con la más baja solidez y la más alta ductilidad.
- **H**- Endurecido por tensión.
- **T**- Tratado térmicamente para producir temples estables distintos de F u O.

Las subdivisiones del tratamiento térmico se presentan a continuación:

- **T1**- Envejecido de manera natural. El producto se enfría después de un proceso de moldeo a temperatura alta y se deja envejecer naturalmente hasta que su condición es sustancialmente estable.

- **T3-** Solución sometida a tratamiento térmico, trabajada en frío y envejecida naturalmente hasta que alcanza una condición sustancialmente estable.
- **T4-** Solución tratada térmicamente y envejecida de manera natural hasta que su condición es sustancialmente estable.
- **T5-** Enfriado a partir de un proceso de moldeo a temperatura alta y luego envejecido artificialmente.
- **T6-** Solución sometida a tratamiento térmico y luego envejecida artificialmente.
- **T7-** Solución sometida a tratamiento térmico y estabilizada.
- **T8-** Solución sometida a tratamiento térmico, trabajada en frío y luego envejecida artificialmente.

#### 2.1.2.3 Aleaciones de fundición de aluminio

Las aleaciones de aluminio suelen ser moldeadas por alguno de los tres procesos principales: moldeo en arena, moldeo permanente y fundido de matrices. Se han desarrollado aleaciones de aluminio que ofrecen cualidades de fundición tales como fluidez y facilidad de vertido, además de las propiedades tales como solidez, ductilidad y resistencia a la corrosión. Por tanto tienen composiciones químicas muy diferentes a las de las aleaciones de aluminio forjado. Estas aleaciones se agrupan según los elementos aleantes principales que contengan, mediante cuatro dígitos con un punto de separación entre los dos últimos dígitos (por ejemplo 332.0)

#### 2.1.3 Aleación de aluminio 6063

Las aleaciones de resistencia media tratables térmicamente del tipo aluminio – magnesio – silicio son la mejor elección si se quiere disminuir la resistencia para obtener inmunidad ante el tipo de ataque intercrystalino que se requiere en los materiales que se usan en las construcciones. Dichas aleaciones resultan satisfactorias en lugares urbanos descubiertos, pero son atacadas con mayor rapidez que las aleaciones de aluminio – magnesio, a pesar de ser menos susceptibles a la corrosión con esfuerzo. [18]

La aleación de aluminio 6063 es al igual que las demás aleaciones de aluminio un material que se destaca por su ligereza y resistencia a la corrosión, así como por su elevada conductividad térmica y eléctrica. Este aluminio pertenece al grupo de aleaciones Al-Mg-Si de la serie 6xxx, las cuales presentan porcentajes de Mg y Si inferiores a 1%, estos dos componentes se combinan entre sí para formar un compuesto intermetálico llamado siliciuro de magnesio  $Mg_2Si$ . Esta aleación de aluminio es considerada generalmente una aleación extruible y tratable térmicamente para aumentar su resistencia, con una maquinabilidad media, capacidad de conformado buena tanto en frío como en caliente, fácilmente soldable por cualquiera de los métodos tradicionales, excelente resistencia a la corrosión, estas propiedades hacen que sea usada en diversas aplicaciones tales como, perfiles de arquitectura, torres de andamios para trabajar en las alturas, carcasa para motores eléctricos, sistemas de ensamblado, elementos especiales para maquinaria, puertas, ventanas, tubos de riego, instalaciones neumáticas, pasamanos de escaleras, barandas tubulares y uniones soldadas, entre otras. [18]

#### 2.1.3.1 Propiedades físicas

Entre las propiedades físicas de la aleación de aluminio AA6063 destacan su baja densidad de  $2,70 \text{ g / cm}^3$ , calor específico elevado de  $0,90 \text{ J/g } ^\circ\text{C}$ , además posee una conductividad térmica muy elevada de  $218 \text{ W/m K}$ , lo cual la hace de gran utilidad en aplicaciones donde se emplee la transferencia de calor, también posee una conductividad eléctrica aceptable que es aproximadamente un 50% de la conductividad eléctrica del cobre.

#### 2.1.3.2 Propiedades mecánicas

A temperatura ambiente en condiciones de recocido, la resistencia a la fluencia es de  $48,3 \text{ MPa}$ , el esfuerzo último a la tracción de  $89,6 \text{ MPa}$ , un módulo de Young de  $68,9 \text{ GPa}$ , durezas algo bajas, en general, no adecuadas para soportar grandes presiones superficiales. Presenta una disminución considerable en sus propiedades cuando la temperatura sobrepasa los  $100^\circ\text{C}$ , en cambio, las propiedades a bajas

temperaturas son excelentes. A continuación se presentan las propiedades mecánicas típicas de la aleación en diferentes condiciones de tratamiento térmico.

**Tabla 2.2** Propiedades del Aluminio 6063- Recocido (O)

<b>Propiedades Mecánicas</b>	<b>Métrico</b>
Dureza	25 HBN
Esfuerzo último	89,6 Mpa.
Esfuerzo de fluencia	48,3 Mpa.
Módulo de elasticidad	68,9 Gpa.
Esfuerzo a fatiga	55,2 Mpa
Módulo de corte	25,8 GPa
Esfuerzo de corte	68,9 MPa

Fuente: [www.Matweb.com](http://www.Matweb.com)

**Tabla 2.3** Propiedades del Aluminio 6063- Envejecimiento natural (T4)

<b>Propiedades Mecánicas</b>	<b>Métrico</b>
Dureza	46,0 HBN
Esfuerzo último	172 MPa
Esfuerzo de fluencia	89,6 MPa
Módulo de elasticidad	68,9 GPa
Módulo de corte	25,8 GPa
Esfuerzo de corte	110 MPa

Fuente: [www.Matweb.com](http://www.Matweb.com)

**Tabla 2.4** Propiedades del Aluminio 6063- Envejecimiento artificial (T6)

<b>Propiedades Mecánicas</b>	<b>Métrico</b>
Dureza	73 HBN
Esfuerzo último	241 MPa
Esfuerzo de fluencia	214 MPa
Módulo de elasticidad	68,9 GPa
Módulo de corte	25,8 GPa
Esfuerzo de corte	152 MPa

Fuente: www.Matweb.com

### 2.1.3.3 Composición química

La composición química de la aleación de aluminio AA6063, está basada principalmente en dos componentes el magnesio y el silicio y otros elementos que también están presentes en menor proporción, a continuación se presenta la composición química según la norma ASTM B221M-05a.

**Tabla 2.5** Composición química (%) de la aleación AA6063.

<i>Aleación</i>	<i>Silicio</i>	<i>Hierro</i>	<i>Cobre</i>	<i>Manganeso</i>	<i>Magnesio</i>	<i>Cromo</i>	<i>Zinc</i>	<i>Titanio</i>
AA6063	0,2-0,6	0,35	0,10	0,10	0,45-0,9	0,10	0,10	0,10

Fuente: Norma ASTM “B221-05 Standard Specification for aluminum alloy for extrusion”

### 2.1.4 Tratamientos térmicos

#### 2.1.4.1 Recocido

El recocido para ablandar al aluminio y sus aleaciones trabajadas en frío se lleva a cabo con normalidad a temperaturas dentro del intervalo de 350 a 450 °C, pero cuando se trata del aluminio comercialmente puro hay una caída notoria en la dureza si la recristalización se efectúa a temperaturas cercanas a 250°C. En las fábricas, la temperatura de recocido, es por lo general, mayor aunque el tamaño del grano del metal recocido es más grande a medida que la temperatura de recocido suba por encima del nivel al cual ocurre la recristalización. Por supuesto, la temperatura de recristalización depende de la composición y de la cantidad de trabajo en frío previo así, el aluminio con una pureza del 99,996% se ablanda a temperaturas tan bajas como 100°C y el metal superpuro puede recristalizarse a la temperatura normal. Las condiciones se deben escoger de manera que impidan el crecimiento excesivo del grano, que de por resultado una cierta pérdida de la resistencia y el surgimiento de rugosidad superficial cuando se vuelva a trabajar el metal. Las condiciones correctas de fabricación y recocido propician una estructura fina y uniforme con un tamaño de grano alrededor de 0,02 – 0,10 mm de diámetro. [18]

El efecto del tratamiento térmico previo quizás también sea importante, ya que influye sobre el tamaño del grano y los valores finales de la dureza.

#### 2.1.4.2 Tratamiento térmico de la solución

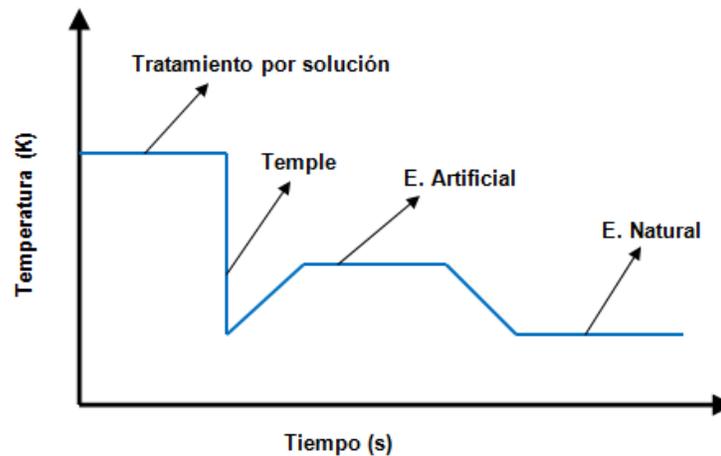
Antes era normal tratar a las hojas térmicamente para solubilizarlas, en hornos de baños de sales, pero en la actualidad es más común emplear grandes hornos de circulación forzada del aire con este fin. Las hojas se suspenden de un marco y se les da el espacio adecuado que permita la libre circulación del aire caliente. La rapidez de calentamiento debe ser alta y la uniformidad de la temperatura durante el periodo de calentamiento hasta una temperatura uniforme, debe mantenerse dentro de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  del valor nominal, puesto que la temperatura óptima está por lo general a sólo unos cuantos grados centígrados de aquella a la cual ocurre la fusión. El tiempo de calentamiento hasta una temperatura uniforme depende del espesor del producto que se trate. Para obtener un templado efectivo, la carga se debe sumergir en el tanque de templado en cuestión de segundos, esta operación deja al material en una condición distorsionada con esfuerzos internos.

#### 2.1.4.3 Tratamientos de precipitación

Algunas aleaciones de aluminio pueden incrementar su resistencia por precipitación mediante un tratamiento térmico. Las aleaciones de aluminio forjado térmicamente tratables de los grupos 2xxx, 6xxx y 7xxx se aumentan su resistencia por precipitación.

Los principales elementos de aleación para el grupo 6xxx son el magnesio y el silicio, que se combinan para formar un compuesto intermetálico,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , que en forma de precipitado endurece a este grupo de aleaciones.

Una de las características de la aleación de aluminio 6063 es la capacidad que tiene para ser endurecida por precipitación, el objetivo de ello es crear, en una aleación tratada térmicamente, una dispersión uniforme de un precipitado fino y duro, en una matriz más blanda y dúctil, con esto logra que las partículas precipitadas actúen como obstáculos al movimiento produciendo así un incremento de la resistencia mecánica. Este tratamiento consta de tres pasos como se muestra en la figura 2.1:



**Figura 2.1** Etapas del endurecimiento por envejecimiento.

## 2.1.5 Tensión y deformación en metales

### 2.1.5.1 Deformación elástica y plástica

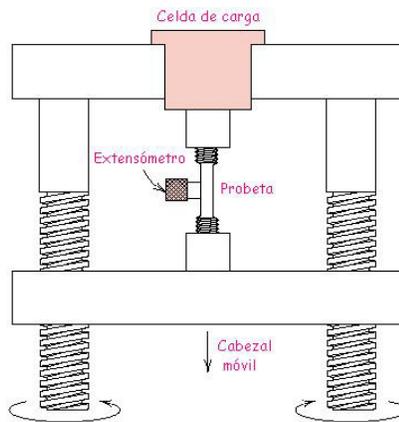
Cuando se somete una pieza de metal a una fuerza de tracción uniaxial se produce la deformación del metal. Si el metal recupera sus dimensiones originales cuando se elimina la fuerza, se considera que el metal ha sufrido una deformación elástica. La cantidad de deformación elástica que puede soportar un metal es pequeña pues durante la deformación elástica, los átomos del metal se desplazan de sus posiciones originales, pero sin llegar a alcanzar las nuevas posiciones. De este modo, cuando la fuerza actúa sobre el metal deformado elásticamente se elimina, los átomos del metal vuelven a sus posiciones iniciales y el metal recupera su forma inicial. Durante la deformación plástica, los átomos del metal se desplazan continuamente desde sus posiciones iniciales hasta otras nuevas. La propiedad que tienen algunos metales de ser extensamente deformados sin que se fracturen, es una de las más utilizadas en ingeniería. [18]

### 2.1.5.2 Comportamiento mecánico a tracción

El ensayo de tracción se utiliza para evaluar la resistencia de metales y aleaciones, una muestra de metal se estira a velocidad constante hasta la fractura, que se produce en un tiempo relativamente corto.

La fuerza que actúa sobre la muestra sometida a ensayo se dibuja en el registrador mediante el desplazamiento del papel de registro, mientras que la deformación correspondiente se obtiene de la señal generada por un extensómetro extremo, sujeto a la muestra y también se dibuja en el papel de registro.

En la máquina se observa cómo la probeta debe estar sujeta por sus extremos a la máquina y ésta desplaza sus mordazas de forma axial, lo que produce una carga sobre la probeta, con esta carga y la sección transversal inicial de la probeta se puede determinar el esfuerzo producido por una determinada fuerza y la deformación de la misma la cual se mide como una relación entre la longitud inicial y final de la probeta en la zona calibrada. En la figura 2.2 se ilustra esquemáticamente como se realiza el ensayo de tracción. [18]



**Figura 2.2** Ilustración esquemática de una Máquina de ensayos de tracción.

A continuación se presentan las ecuaciones para el cálculo del esfuerzo y la deformación en un ensayo de tracción:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

$$e = \frac{L_F - L_0}{L_0} \quad (2.2)$$

Todos los materiales metálicos tienen un comportamiento elástico y plástico, el intervalo elástico representa la zona de deformaciones que soporta el material sin deformarse de manera permanente, en este intervalo el material sufre un proceso de recuperación en donde la muestra vuelve a sus dimensiones iniciales si la fuerza aplicada ya no se presenta, mientras que en el intervalo de plasticidad una vez que se retira la acción de la fuerza la probeta jamás recupera sus dimensiones iniciales ya que las deformaciones presentes allí son de carácter permanente.

A continuación se presenta el diagrama esfuerzo – deformación convencional de un material metálico

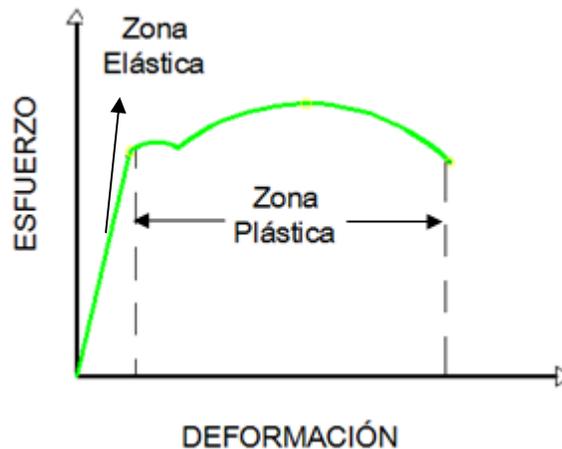


Figura 2.3 Diagrama esfuerzo- deformación ingenieril.

Las propiedades mecánicas de metales y aleaciones que tienen interés para el diseño estructural en ingeniería, y que pueden obtenerse a partir del ensayo de tracción técnico, son:

**Módulo de elasticidad:** en la primera parte del ensayo de tracción, el metal se deforma elásticamente. Es decir, si la fuerza que actúa sobre la muestra desaparece, la probeta volverá a su longitud inicial. Para metales, la máxima deformación elástica suele ser inferior a 0,5 por ciento. En general, los metales y aleaciones muestran una

relación lineal entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida en la región elástica del diagrama convencional que se describe por la ley de Hooke;

$$\sigma(\text{esfuerzo}) = E \cdot e(\text{deformación}) \quad (2.3)$$

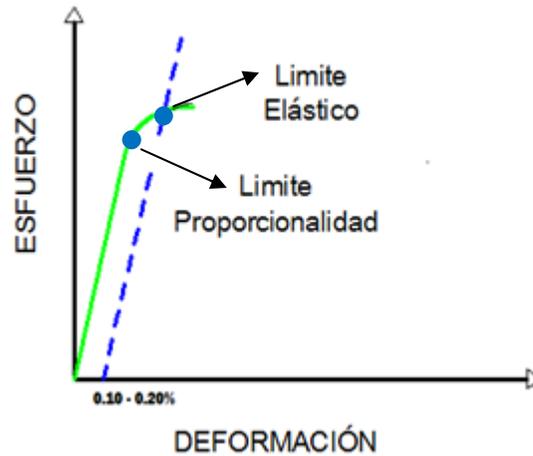
ó también:

$$E = \frac{\sigma(\text{esfuerzo})}{e(\text{deformación})} \quad (2.4)$$

Donde E es el módulo de elasticidad, o módulo de Young.

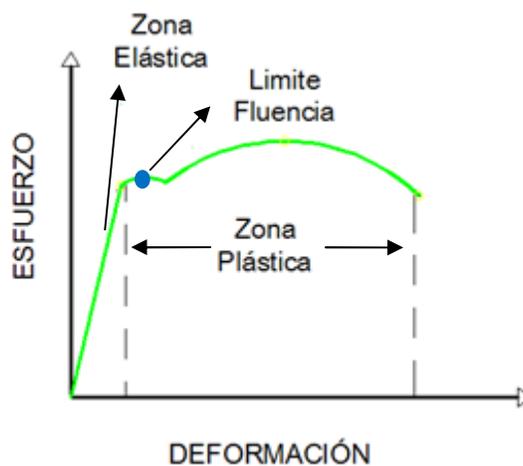
El módulo de elasticidad está relacionado con la fuerza del enlace entre los átomos del metal o aleación. Los metales con alto módulo de elasticidad son relativamente rígidos y no flechan fácilmente, las aleaciones de aluminio tienen un módulo de elasticidad alrededor de 10 a 11 x 10<sup>6</sup> psi (69 a 76 GPa). Nótese que en la región elástica del diagrama esfuerzo – deformación, el valor del módulo no varía con el incremento del esfuerzo.

**Límite elástico:** el límite elástico es un valor muy importante para el diseño estructural en ingeniería, pues es el nivel de esfuerzo al que un metal o aleación muestra una deformación plástica significativa. Debido a que no hay un punto definido de la curva esfuerzo - deformación donde acaba la deformación elástica y empieza la deformación plástica, se determina el límite elástico como el esfuerzo al que se produce una deformación elástica definida. En muchas ocasiones se determina el límite cuando se produce una deformación de 0,2 por ciento. El límite elástico de 0,2 por ciento, también llamado límite elástico convencional de 0,2 por ciento, se determina a partir del diagrama esfuerzo- deformación, como se muestra en la figura 2.4. Primero se traza una línea paralela a la zona elástica (lineal) del diagrama a una deformación de 0.002 pulg/pulg (m/m), como se indica en la figura 2.4. Después se traza una horizontal desde el punto de intersección entre la línea anterior y la parte superior de la curva esfuerzo - deformación hasta que alcance el eje de las ordenadas (esfuerzos).



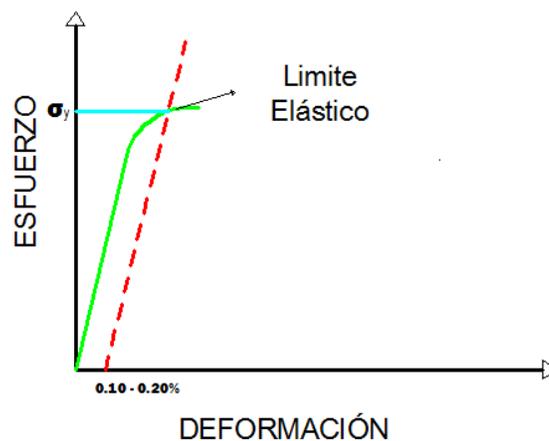
**Figura 2.4** Límite elástico y límite de proporcionalidad.

**Límite de fluencia:** Conforme la carga en la pieza a prueba aumenta más allá del límite elástico, se alcanza un esfuerzo al cual el material continúa deformándose sin que haya incremento de la carga. El esfuerzo puede disminuir realmente por un momento, resultando en un punto de fluencia superior y en uno inferior. Como el punto de fluencia es relativamente fácil de determinar y la deformación permanente es pequeña hasta el punto de fluencia, constituye un valor muy importante de considerar en el diseño de muchas partes para maquinaria cuya utilidad se afectaría si ocurriera una gran deformación permanente. Esto es válido sólo para materiales que exhiban un punto de fluencia bien definido.



**Figura 2.5** Límite de fluencia.

**Resistencia a la fluencia:** La mayoría de los materiales no ferrosos y los aceros de alta resistencia no tienen un punto de fluencia definido. Para estos materiales, la máxima resistencia útil corresponde a la resistencia de fluencia, que es el esfuerzo al cual un material exhibe una desviación limitante especificada de la proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación. Por lo general, este valor se determina por el método de la deformación permanente específica (método offset). En la figura 2.4, la deformación especificada se encuentra generalmente entre un valor de 0,10% y 0,20 % de la longitud calibrada. Posteriormente, se traza una línea paralela al segmento proporcional de la curva esfuerzo - deformación, la intersección de la línea paralela con la curva esfuerzo deformación indica la resistencia de fluencia.

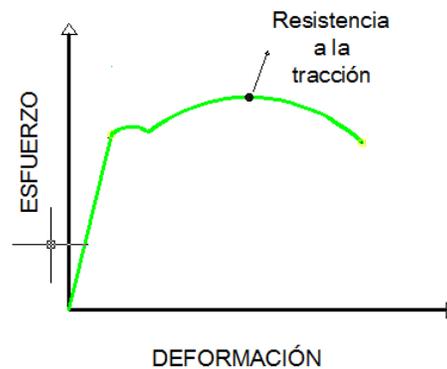


**Figura 2.6** Resistencia a la fluencia.

**Resistencia a la tracción:** la resistencia a la tracción es el máximo esfuerzo que se alcanza en la curva esfuerzo - deformación. Si la probeta desarrolla un decrecimiento localizado de la sección transversal (comúnmente denominada estricción), el esfuerzo decrecerá con el incremento de la deformación hasta producirse la fractura, porque la deformación convencional se determina utilizando el área original de la sección transversal de la probeta. Cuanto más dúctil es el metal, mayor es la estricción antes de la fractura y más descendente es el esfuerzo alejándose del valor de resistencia a la tracción.

Un punto importante del diagrama esfuerzo - deformación que se debe entender es que el metal o aleación puede soportar esfuerzos superiores al propio esfuerzo de

fractura. Esto sólo se debe a que se utiliza el área original de la sección transversal para determinar el esfuerzo y que el esfuerzo soportado descende en la última parte del ensayo. La resistencia a la tracción de un metal se determina trazando una línea horizontal desde el punto máximo de la curva esfuerzo- deformación hasta el eje de las ordenadas (esfuerzos). El valor de esfuerzo donde esa línea intersecta al eje de los esfuerzos se denomina resistencia a la tracción. Este parámetro no es de mucha utilidad en el diseño ingenieril con aleaciones dúctiles porque se produce mucha deformación plástica antes de alcanzarlo. No obstante, la resistencia a la tracción puede aportar alguna información sobre la presencia de defectos. Si el metal contiene porosidad o inclusiones, estos defectos pueden producir que el valor de la resistencia máxima sea menor que lo normal. [18]



**Figura 2.7** Resistencia a la tracción.

**Porcentaje de alargamiento:** el porcentaje de alargamiento que una probeta a tracción soporta durante el ensayo proporciona un valor de la ductilidad del metal. La ductilidad de metales suele expresarse como porcentaje de alargamiento. En general, a mayor ductilidad del metal (a mayor capacidad de deformación), mayor es el porcentaje de deformación.

Como se ha mencionado previamente, durante el ensayo de tracción se puede utilizar un extensómetro para determinar continuamente la deformación producida durante el ensayo. No obstante, el porcentaje de deformación de una probeta después

de la fractura se puede medir uniendo los fragmentos y midiendo la longitud final con un calibre.

El porcentaje de alargamiento se calcula mediante la ecuación:

$$\% \text{alargamiento} = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100\% \quad (2.5)$$

El porcentaje de alargamiento a fractura tiene importancias no sólo como medida de la ductilidad, sino también como índice de la calidad del metal. Si existe porosidad o inclusiones en el metal, o si existe un deterioro debido a un sobrecalentamiento del mismo, el porcentaje de alargamiento decrecerá por debajo del valor normal. [18]

**Porcentaje de estricción:** la ductilidad de un metal o aleación también se puede expresar en términos del porcentaje de reducción de área o estricción. Esta magnitud normalmente se obtiene del ensayo de tracción. Después del ensayo, se determina el diámetro de la sección transversal de la zona de fractura. Utilizando las medidas del diámetro inicial y del diámetro final, el porcentaje de estricción se determina según:

$$\% RA = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\% \quad (2.6)$$

El porcentaje de reducción de área, como el porcentaje de alargamiento, es una medida de la ductilidad del metal y un índice de su calidad. El porcentaje de reducción en el área se puede disminuir si existen defectos como inclusiones y porosidades en la muestra metálica.

Otras de las propiedades del material que se pueden determinar a partir del diagrama esfuerzo – deformación obtenido a partir de un ensayo de tracción, son:

**Resiliencia:** es la energía absorbida en el campo elástico. Se cuantifica como el área bajo la curva en el campo elástico. Se interpreta como una medida de la energía por

unidad de volumen que puede absorber un material sin sufrir deformación permanente y que por tanto, se libera al retirar la carga. [1]

**Tenacidad:** es la energía absorbida por el material en el campo plástico. Es la capacidad de un material para absorber energía y deformarse plásticamente antes de fracturarse. Se denota como el área bajo la totalidad de la curva esfuerzo – deformación en el ensayo de tracción. Esta es principalmente una propiedad del intervalo plástico, ya que solo una pequeña parte de la energía total absorbida es energía elástica que puede recuperarse cuando se suprime el esfuerzo. [1]

**Módulo de Poisson:** la deformación longitudinal elástica de un metal produce un cambio simultáneo de las dimensiones laterales. Un esfuerzo a tracción, produce una deformación axial y una contracción lateral, si la conducta es isotrópica y las deformaciones tanto longitudinales como laterales son iguales, la relación entre la deformación lateral y la deformación longitudinal se denomina coeficiente de Poisson. [1]

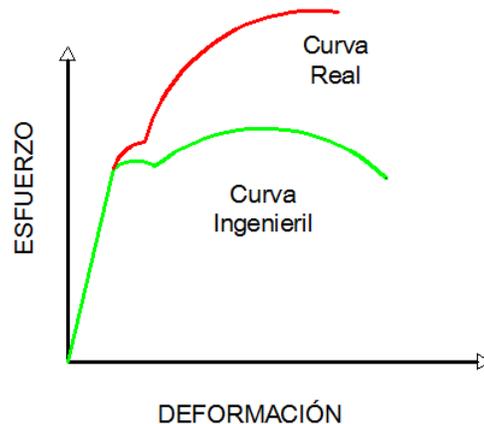
### 2.1.5.3 Esfuerzo real y deformación real

El esfuerzo convencional se calcula dividiendo la fuerza  $F$  a una probeta de tracción por el área de su sección inicial  $A_0$ . Puesto que la sección transversal de la muestra cambia continuamente durante el ensayo de tracción, el esfuerzo convencional así calculado no es preciso. Durante el ensayo de tracción y después de que aparezca la estricción de la muestra, el esfuerzo convencional disminuye mientras la deformación aumenta, formándose un máximo en la curva esfuerzo - deformación convencional. Por tanto una vez iniciada la estricción durante el ensayo de tracción, el esfuerzo real es mayor que el esfuerzo convencional. El esfuerzo real y la deformación real se definen como:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_i} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_t = \int_{l_0}^{l_f} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_0} \quad (2.8)$$

Donde  $F$  es la fuerza uniaxial aplicada sobre la muestra,  $A_i$  es el área mínima de la sección transversal,  $l_i$  es la longitud instantánea durante el ensayo y  $l_0$  es la longitud inicial.



**Figura 2.8** Diagrama esfuerzo- deformación ingenieril y real.

## 2.1.6 Comportamiento mecánico a torsión

### 2.1.6.1 Ensayo de torsión

En general un ensayo como el de torsión se utiliza para extraer la información clásica que genera una diagrama esfuerzo – deformación, la diferencia o la particularidad radica en que las curvas que se obtienen mediante el ensayo de torsión admiten deformaciones más grandes que las que se pudiesen obtener en un ensayo de tracción o compresión, manteniendo, las dimensiones externas de la probeta casi intactas, es por ello que el ensayo de torsión es muy útil en procesos de conformado en donde se producen reducciones de secciones muy grandes; cabe destacar que en la curva obtenida en este ensayo la tensión de fluencia es la ocasionada por el esfuerzo cortante puro.

El ensayo de torsión suministra información del comportamiento al corte del material y la información de su comportamiento a tracción se puede deducir, a partir de la aplicación de los criterios de fluencia.

La información que se puede obtener a partir de un ensayo de torsión es la siguiente:

**Límite de fluencia al corte:** en general es el punto en donde la zona elástica se acaba, en los ensayos de torsión suele apreciarse muy bien este punto a diferencia de los ensayos de tracción, en donde este punto no se observa claramente. En los ensayos de torsión suele haber una transición suave entre la zona elástica y la zona plástica.

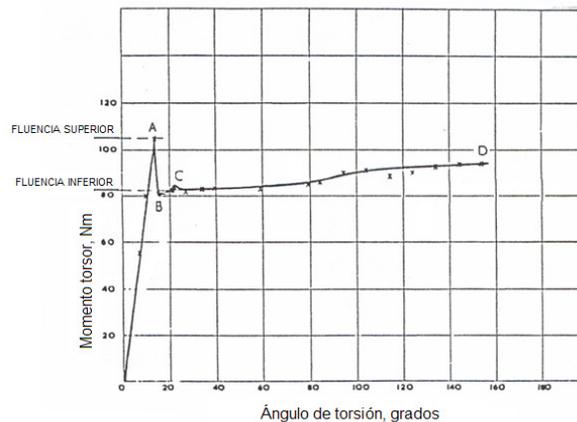
**Resistencia a la ruptura:** es el esfuerzo en donde ocurre la ruptura de la probeta, en la mayoría de los ensayos de torsión este valor coincide con el esfuerzo máximo.

**Módulo de corte:** es la pendiente de la recta en la zona elástica de la curva esfuerzo - deformación, este da una idea de la rigidez del material en condiciones de esfuerzos cortantes.

### 2.1.6.2 Diagrama de momento torsor y ángulo de torsión

La obtención del diagrama de momento torsor en función del ángulo de torsión, para una probeta cilíndrica sometida a torsión, es fundamental para determinar el módulo de rigidez al corte, el esfuerzo cortante en el límite de proporcionalidad y el esfuerzo cortante de fluencia.

En la figura 2.9 se indica el diagrama de momento torsor versus ángulo de torsión. En dicho diagrama se pueden distinguir: El límite de proporcionalidad, el límite de fluencia y el límite de ruptura de la probeta, señalado con el punto D. La zona lineal del gráfico, permite determinar el módulo de rigidez al corte del material y el esfuerzo cortante en el límite de proporcionalidad. El esfuerzo cortante de fluencia superior se determina a través del punto A del diagrama.



**Figura 2.9** Diagrama de momento torsor vs ángulo de torsión.

### 2.1.6.3 Definición de esfuerzo cortante y distorsión angular

Si una probeta cilíndrica de longitud  $L$  es sometida a un torque  $T$ , el ángulo de torsión  $\varphi$  está dado por la siguiente ecuación:

$$\varphi = \frac{T L}{G I_p} \quad (2.9)$$

En donde  $G$  es el módulo de corte del material de la probeta e  $I_p$  es el momento de inercia polar de la sección circular de dicha probeta. [21]

En la figura 2.10 se indica una probeta de sección circular de radio  $R$ , sometida a un momento torsor  $T$ .

En consecuencia, el valor del módulo de corte  $G$  es igual a:

$$G = \frac{T L}{\varphi I_p} \quad (2.10)$$

Sobre la base de la ecuación anterior, se puede determinar experimentalmente el módulo de corte  $G$  del material constituyente de la probeta. [21]

Si los esfuerzos cortantes no sobrepasan el límite de proporcionalidad, dicho esfuerzo se distribuye linealmente, es cero en el eje central de la probeta y tiene un valor máximo en la periferia. Si se tiene una probeta de sección cilíndrica sometida a torsión, el valor del esfuerzo cortante es igual a:

$$\tau = \frac{T}{W_p} \quad (2.11)$$

Siendo  $W_p$  el módulo resistente a la torsión y está definido por:

$$W_p = \frac{1}{R} I_{polar} \quad (2.12)$$

Donde:

$$I_{\text{polar}} = \frac{1}{32} \pi d^4 = \frac{1}{2} \pi R^4 \quad (2.13)$$

Siendo  $d$  el diámetro de la probeta, por lo tanto  $d = 2R$ .

Reemplazando el momento de inercia polar, en función del radio, se obtiene la siguiente expresión para el módulo resistente:

$$W_p = \frac{\pi R^3}{2} \quad (2.14)$$

Por lo tanto, el esfuerzo cortante en la periferia del cilindro es igual a:

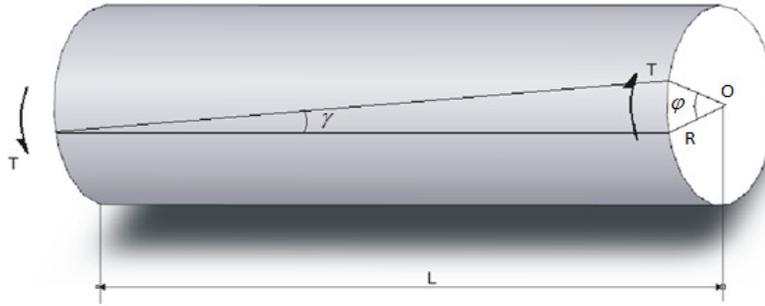
$$\tau = \frac{2T}{\pi R^3} \quad (2.15)$$

De la figura 2.10, considerando la igualdad de arcos, según el radio  $R$  y la generatriz  $L$ , se puede deducir lo siguiente:

$$\phi R = \gamma L \quad (2.16)$$

Donde  $\gamma$  es la distorsión angular. Se puede deducir que dicho valor es:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (2.17)$$



**Figura 2.10** Probeta de sección circular de radio (R) y longitud (L), sometida a un momento torsor (T). Fuente: Vedia, L. 2001.

#### 2.1.6.4 Esfuerzos para grandes deformaciones

Superando el límite elástico del material, las tensiones de corte en el eje no son proporcionales a la distancia al centro del mismo. No obstante se continúa cumpliendo que:

$$\gamma = r \cdot \theta_L \quad (2.18)$$

Sabiendo que la sección transversal es circular se cumple que:

$$M_T = 2\pi \int_0^r \tau \cdot r^2 dr \quad (2.19)$$

Donde r es el radio de la sección transversal, y  $\tau$  es función de la deformación angular y se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{1}{2\pi \cdot r^3} \left( \frac{dM_t}{d\theta_L} \cdot \theta_L + 3 \cdot Mt \right) \quad (2.20)$$

Los términos de esta ecuación pueden ser extraídos de la curva de momento torsor contra ángulo de deformación, si se observa la figura 2.11, se puede apreciar que

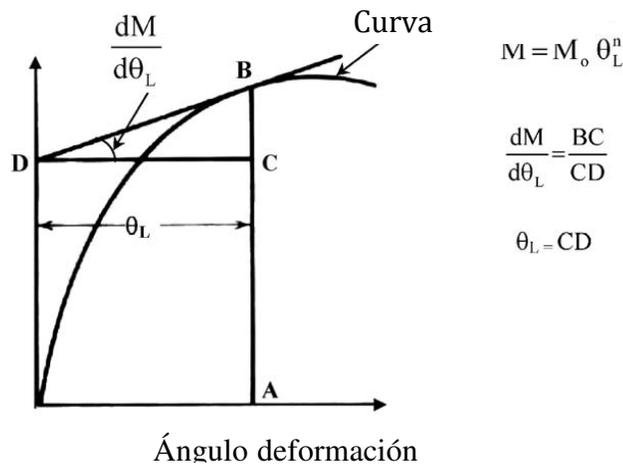
el término  $dMt/d\theta_L$ , es la pendiente de la recta tangente a los puntos de la curva en la región plástica y  $\theta_L$  está representado en el eje x, aplicando trigonometría básica se puede obtener la siguiente expresión:

$$\frac{dMt}{d\theta_L} \cdot \theta_L = BC \tag{2.21}$$

Si el momento torsor está representado en el eje y, se puede escribir esta ecuación de la siguiente forma:

$$\tau = \frac{1}{2\pi \cdot r^3} (BC + 3 \cdot BA) \tag{2.22}$$

Con esta ecuación se puede obtener el esfuerzo de corte para cualquier punto de la curva momento torsor vs ángulo de giro, esta ecuación requiere que se midan los segmentos, más adelante se procederá a modelar el comportamiento de la zona plástica de la curva bajo una ecuación potencial de grado n, con esto se obtendrá una ecuación genérica que permitirá obtener los esfuerzos cortantes en la zona plástica a partir de la curva momento torsor vs ángulo de giro. [4]



**Figura 2.11** Comportamiento en la región plástica de la curva momento torsor vs ángulo de deformación. Fuente: Divo, J. 2006

Como la zona plástica tiene un comportamiento potencial, es posible emplear la siguiente ecuación:

$$M_T = M_o \cdot \theta_L^n \quad (2.23)$$

Diferenciando esta ecuación con respecto a  $\theta_L$ .

$$\frac{dMt}{d\theta_L} = M_o \cdot n \cdot \theta_L^{n-1} = M_o \cdot n \cdot \frac{\theta_L^n}{\theta_L} \quad (2.24)$$

Esta expresión se puede sustituir en la ecuación, y así se obtiene:

$$\tau = \frac{1}{2\pi \cdot r^3} \left( \frac{n \cdot Mt}{\theta_L} \cdot \theta_L + 3 \cdot Mt \right) = \frac{1}{2\pi \cdot r^3} (n \cdot Mt + 3 \cdot Mt) \quad (2.25)$$

Esta ecuación permite obtener el esfuerzo de corte para cualquier punto de la zona plástica, a  $n$  se le llama exponente de endurecimiento por deformación. [4]

Una manera de determinar el coeficiente de endurecimiento por deformación es, graficando la zona plástica de la curva de momento torsor vs ángulo de deformación en una escala logarítmica, lo cual originara una tendencia recta, la pendiente de esta será el valor del exponente  $n$ . Conociendo dos puntos de esta recta (a,b) el valor  $n$  se puede determinar cómo:

$$n = \frac{\log M_a - \log M_b}{\log \theta_{La} - \log \theta_{Lb}} \quad (2.26)$$

### 2.1.7 Dureza y ensayo de dureza

La dureza es una medida de la resistencia de un metal a la deformación permanente (plástica). La dureza de un metal se mide forzando la indentación de un penetrador en la superficie del metal. El penetrador que normalmente es una bola, pirámide, o cono, está fabricado con un material mucho más duro que el material a ensayar. En la mayoría de los ensayos de dureza normalizados se aplica lentamente una carga conocida, que presiona el penetrador contra la superficie del metal a ensayar y perpendicularmente a esta. Después de producir la indentación se retira el penetrador. Se calcula o se lee en un dial un número empírico de dureza basado en el área del corte transversal de la huella producida o en su profundidad. [18]

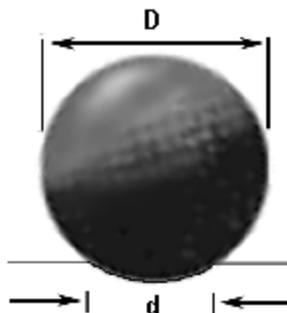
La dureza de un metal se mide según sea la facilidad con que puede ser deformado plásticamente. Por lo tanto, se puede determinar una relación experimental entre la dureza y la resistencia para cada metal en particular. El ensayo de dureza es mucho más simple que el de tracción y puede ser no destructivo. Por estas razones es común la utilización del ensayo de dureza en el control de calidad de procesos industriales.

#### 2.1.7.1 Ensayo Brinell

Indentador: esfera de 10mm de acero o carburo de tungsteno.

Carga = P ;

$$HBN = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (2.27)$$



**Figura 2.12** Identador de esfera de acero ó de carburo de tungsteno.

### 2.1.7.2 Ensayo Rockwell.

Las escalas Rockwell empleadas más comúnmente son la B(marcador de bola de 1/16 de pulg. Y 100 kg de carga) y la C (marcador de diamante y 150 kg de carga), ambas obtenidas con el probador normal. Debido a las muchas escalas Rockwell, el número de dureza debe especificarse mediante el símbolo HR seguido de la letra que designa a la escala y precedido de los números de dureza. Para la conversión de la dureza Rockwell a las otras escalas se usa la norma ASTM E – 140.

### 2.1.8 Microdureza

Este ensayo consiste en generar una huella muy pequeña para medir la dureza de zonas de pequeño tamaño. Esto se hace aplicando cargas muy pequeñas. Son ensayos de precisión. Se utilizan por ejemplo en metalurgia para evaluar la dureza entre fases diferentes o para analizar la dureza de un recubrimiento (como son galvanizados).

El principal inconveniente es que necesitan una gran preparación superficial, llegando al pulido metalográfica, también denominado “acabado superficial”.

Se tienen dos clases de ensayos de microdureza. El Vickers, el cual utiliza un Identador piramidal de base cuadrada. Las últimas normas limitan el campo de aplicación a cargas de un valor situado entre 10 y 200 gramos.

El otro ensayo es el ensayo Knoop. Este utiliza como Identador una pirámide de diamante con ángulos entre aristas de  $172^{\circ}30'$  y  $130^{\circ}$ . Aquí se calcula la superficie a partir de la diagonal principal.

### 2.1.9 Criterios de fluencia

Son teorías a partir de las cuales se trata de determinar el esfuerzo al cual va a fallar un material dúctil por fluencia, estos criterios son el punto de partida del conformado de los metales, y son de gran utilidad en el diseño de elementos que no pueden sufrir deformaciones permanentes.

Se han propuesto diversos criterios de fluencia, entre los cuales se pueden mencionar el Criterio de falla de la máxima tensión normal (o teoría de Rankine), Criterio de falla de la máxima tensión tangencial, Criterio de la máxima tensión de corte, Criterio de falla de la máxima energía de distorsión, siendo los más importantes el de la tensión máxima de corte (Tresca), y el de la máxima energía de distorsión (Von Mises). [17]

### 2.1.9.1 Criterio de la Máxima Tensión de Corte

El criterio de Tresca establece que el material comienza a deformarse plásticamente cuando el esfuerzo de corte máximo alcanza un determinado valor y dicho valor corresponde al valor que tendrá el esfuerzo de corte máximo en un ensayo de tracción cuando se alcanza la fluencia. Para que se presente la fluencia en un material dúctil, el esfuerzo de corte máximo se expresa como:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2.28)$$

Para el caso de un ensayo de tracción, cuando ocurre la fluencia, se tiene que:

$$\sigma_1 = Y ; \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

Sustituyendo estas condiciones en la ecuación de Tresca, se tiene que:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{Y}{2} \quad (2.29)$$

Al igualar las ecuaciones 1 y 3, se obtiene el criterio de Tresca para fluencia de materiales dúctiles:

$$\sigma_1 - \sigma_3 \geq Y \quad (2.30)$$

Con este criterio se pueden hallar las relaciones entre el esfuerzo de fluencia a tracción (Y), el esfuerzo de fluencia en compresión plana (S) y el esfuerzo de fluencia en corte puro (K). [17]

Relación entre el esfuerzo de fluencia a tracción (Y) y el esfuerzo de fluencia a compresión plana (S):

$$S = Y \quad (2.31)$$

Relación entre el esfuerzo de fluencia en corte puro (K) y el esfuerzo de fluencia a tracción (Y):

$$2K = Y \quad (2.32)$$

De acuerdo con esto, el criterio de Tresca relaciona a Y, S y K de la siguiente manera:

$$Y = S = 2K \quad (2.33)$$

#### 2.1.9.2 Criterio de falla de la máxima energía de distorsión

El criterio de Von Mises establece que el material empieza a deformarse plásticamente cuando el esfuerzo de corte máximo alcanza un valor, y dicho valor corresponde al valor que tendrá el esfuerzo de corte octaedral en un ensayo de tracción cuando se alcanza la fluencia. [17]

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.34)$$

Al igual que en el criterio de Tresca, cuando se presenta el caso de un ensayo de tracción que ocurra la fluencia, se tiene que:

$$\sigma_1 = Y ; \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

Sustituyendo estas condiciones en la ecuación 2.34, se tiene que:

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot Y \quad (2.35)$$

Al igualar las ecuaciones 1 y 3, se obtiene el criterio de Von Mises Para fluencia de materiales dúctiles.

$$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \geq Y \quad (2.36)$$

De igual manera con este criterio también se pueden hallar las relaciones entre el esfuerzo de fluencia a tracción (Y), el esfuerzo de fluencia en compresión plana (S) y el esfuerzo de fluencia en corte puro (K). [17]

Relación entre el esfuerzo de fluencia a tracción (Y) y el esfuerzo de fluencia a compresión plana (S):

$$S = 1,155 Y \quad (2.37)$$

Relación entre el esfuerzo de fluencia en corte puro (K) y el esfuerzo de fluencia a tracción (Y):

$$K = 0,577 Y \quad (2.38)$$

De acuerdo con esto, el criterio de Von Mises relaciona a Y, S y K de la siguiente manera:

$$Y = 0,866 S = 1,732 K \quad (2.39)$$



# CAPÍTULO 3

## *Marco Metodológico*

---

### 3.1 Diseño de la investigación

El proceso establecido para cumplir los objetivos fijados fue el siguiente:

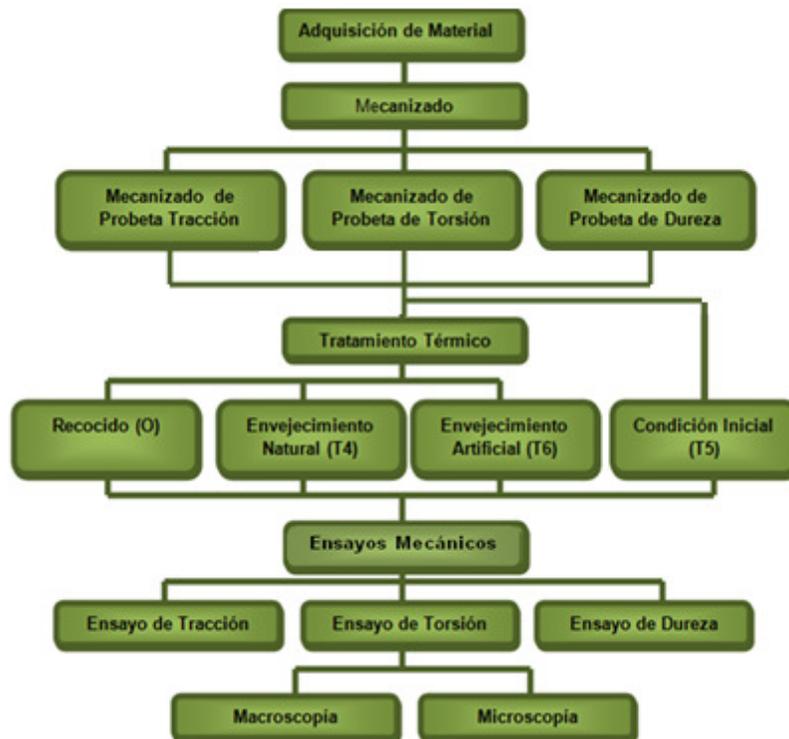


Figura 3.1 Diagrama de proceso.

### 3.1.1 Adquisición del material

El aluminio AA6063, comercialmente es presentado en distintas formas, en nuestro caso fue preciso la adquisición del mismo en barras cilíndricas  $\frac{3}{4}$ " de diámetro por una longitud de 2 metros y barras cilíndricas de  $1\frac{1}{2}$ " de 1 metro de longitud, que presentaron inicialmente un tratamiento térmico T5, presentando la siguiente composición química:

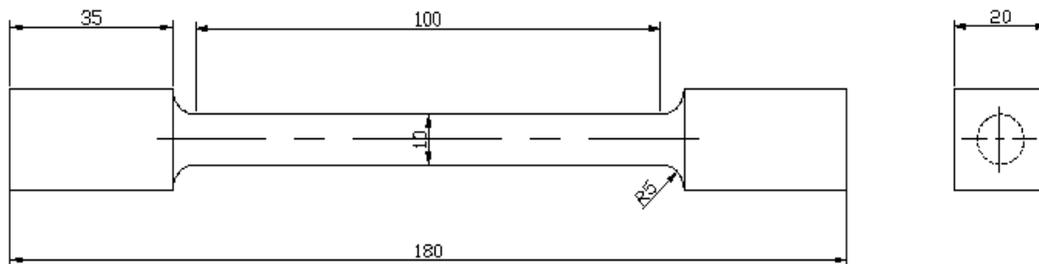
**Tabla 3.1** Composición química única del AA6063 utilizada en los ensayos.

Silicio	Hierro	Cobre	Magnesio	Manganeso	Cromo	Zinc	Titanio
0,44	0,24	0,020	0,55	0,020	0,02	0,02	0,022

Fuente: Aluminios de Venezuela. C.A Certificado de Calidad. N°7977, Hoja de ruta: 525066

### 3.1.2 Elaboración de las probetas

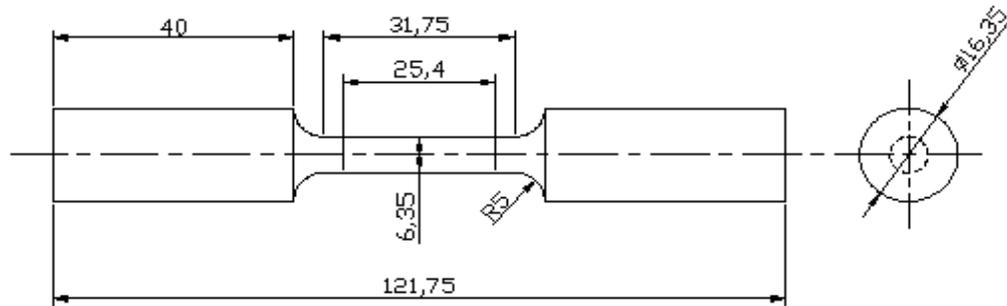
A partir de barras cilíndricas de  $1\frac{1}{2}$ " se fabricaron las probetas de torsión bajo las recomendaciones de las normas COVENIN 907- 1997 para las dimensiones de las probetas; y las especificaciones de la máquina del ensayo de torsión para los extremos de la probeta, la geometría de la probeta se muestra en la figura 3.2. La manufactura de las probetas de torsión se efectuó en un torno y una fresadora mediante un proceso de arranque de viruta (Mecanizado).



**Figura 3.2** Probeta para ensayo de torsión, todas las medidas en mm.

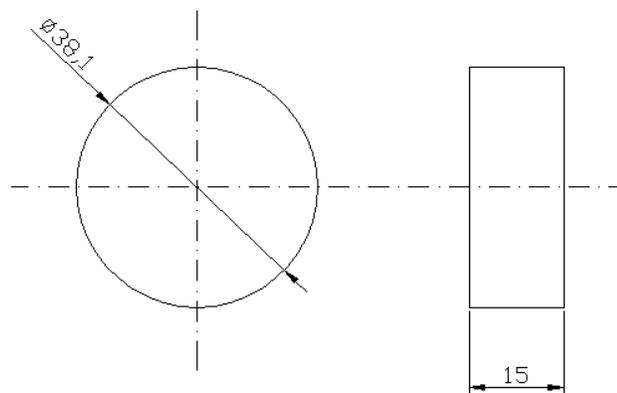
Las probetas de tracción se fabricaron a partir de barras circulares de  $\frac{3}{4}$ ", utilizando las condiciones exigidas por las normas ASTM B557, la cual se aplica a

ensayos de tracción en aleaciones de aluminio y magnesio. La elaboración de las probetas se realizó en un torno mediante un proceso de arranque de viruta para obtener las dimensiones deseadas. Las dimensiones de la probeta de tracción se muestran en la siguiente figura:



**Figura 3.3** Probeta para ensayo de tracción, todas las medidas en mm.

Las probetas de los ensayos de dureza, se fabricaron a partir de barras cilíndricas de 1 ½" de diámetro, bajo las recomendaciones de la norma E18-05 "Métodos para el ensayo de Dureza Rockwell y dureza superficial Rockwell", las dimensiones de la probeta se muestran en la siguiente figura:



**Figura 3.4** Probeta para ensayo de dureza, todas las medidas en mm.

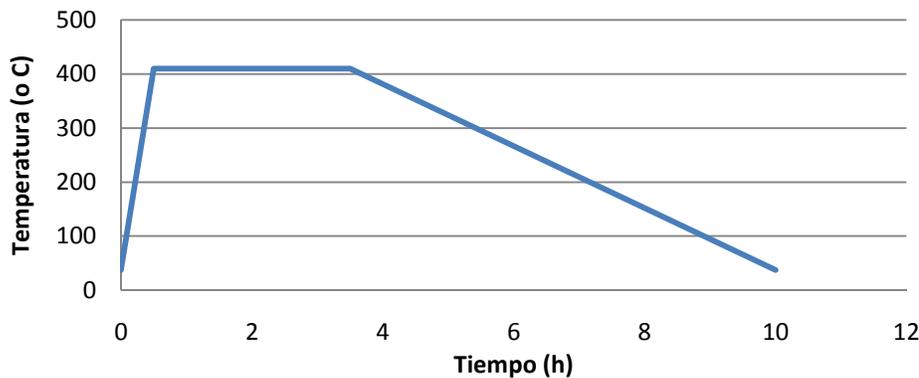
### 3.1.3 Aplicación de tratamientos térmicos

Luego se aplicaron los tratamientos térmicos a las distintas probetas en el horno eléctrico (ver figura 3.9), ubicada en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de

Mecánica de la Universidad de Carabobo (observar especificaciones en la tabla 3.3). La temperatura, tiempo de estadía en el horno y la velocidad de enfriamiento, fueron valores tomados de la norma B918-01 denominada “Tratamientos Térmicos de las Aleaciones de Aluminio Forjadas”.

### 3.1.3.1 Recocido (O)

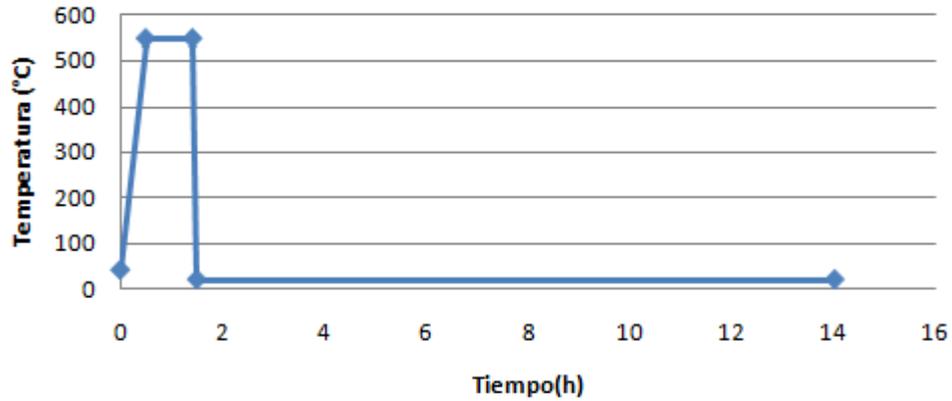
Las probetas fueron sometidas a una temperatura de 410 °C (770 K), durante un tiempo de 180 minutos, para después dejarse enfriar dentro del horno; la finalidad de este tratamiento térmico es lograr que el material posea la menor cantidad de trabajo en frío. La norma ASTM B918 establece la temperatura del tratamiento y el tiempo de aplicación varía entre un intervalo de dos a tres horas.



**Figura 3.5** Ciclo térmico del recocido (O).

### 3.1.3.2 Endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)

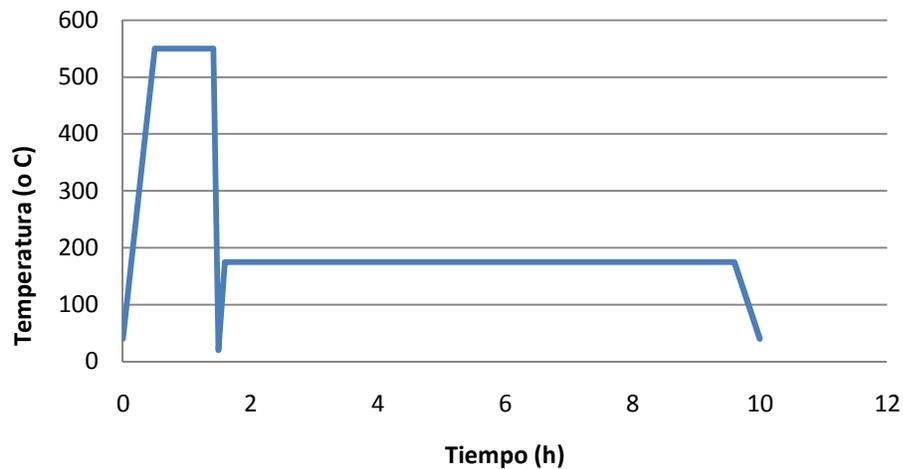
Inicialmente las probetas para los ensayos fueron sometidas a un tratamiento térmico de solución en la cual se aplicó un proceso de calentamiento hasta 522 °C (795 K), por un tiempo de 55 minutos aproximadamente, seguido por un proceso de enfriamiento rápido en agua, para luego aplicar envejecimiento natural, en donde, las probetas se dejaron al aire tranquilo.



**Figura 3.6** Ciclo térmico del tratamiento T4.

### 3.1.3.3 Endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)

Inicialmente las probetas para los ensayos fueron sometidas a un tratamiento térmico de solución en la cual se aplicó un proceso de calentamiento hasta 522 °C (795 K), por un tiempo de 55 minutos aproximadamente, seguido por un proceso de enfriamiento rápido en agua, para luego aplicar envejecimiento artificial, en donde, las probetas se calentaron a 180 °C (453 K) durante un tiempo de 7 horas y luego se dejaron al aire tranquilo. Es importante saber que la norma ASTM B918 establece la temperatura de envejecimiento y el tiempo de calentamiento.



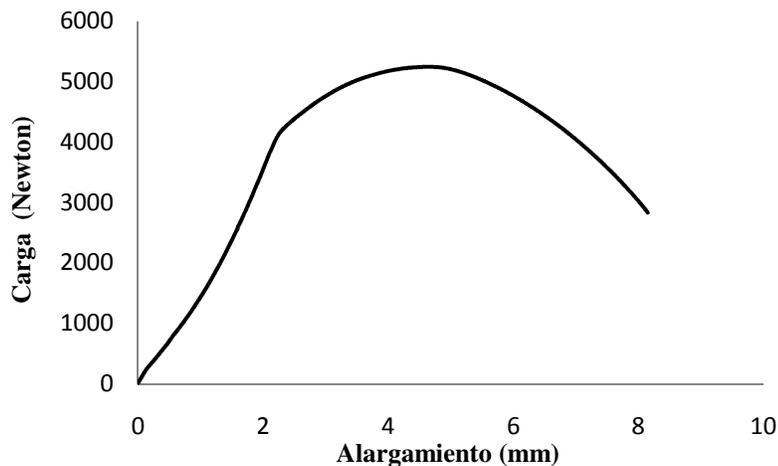
**Figura 3.7** Ciclo térmico del tratamiento T6.

### 3.1.4 Ensayos mecánicos

#### 3.1.4.1 Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción se efectuaron en el banco universal para ensayos de tracción (marca: GALDABINI, el cual se encuentra en el laboratorio de Materiales de la Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería), en donde, se ensayaron las probetas mostradas en la Figura 3.3, en el cual las dimensiones de las probetas están regidas por la normas ASTM B557, para la ejecución de los ensayos de tracción en aleación de aluminio AA6063.

En el ensayo de tracción se utilizaron cuatro (4) probetas por cada condición de tratamiento térmico, en este ensayo se aplicó una carga axial tal que provoque la fractura de la misma. La velocidad del ensayo para la zona elástica fue de 2,5 mm/min y para la zona plástica 5 mm/min. Finalmente la máquina reportó una gráfica de carga axial aplicada en función del alargamiento de la probeta, como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 3.8** Gráfica de carga Vs alargamiento.

Al obtener esta curva se requiere transformarla en la curva esfuerzo vs deformación, para ello se aplicarán las ecuaciones necesarias empleando el siguiente procedimiento:

Primeramente se realizará la transformación de los valores de carga a valores de esfuerzo, como se muestra a continuación:

Para obtener el valor del esfuerzo ingenieril se aplica la ecuación 2.1 de la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{F}{A_o}$$

Donde F es la carga aplicada, y  $A_o$  representa el área inicial de la probeta, la cual se determina de la siguiente manera:

$$A_o = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

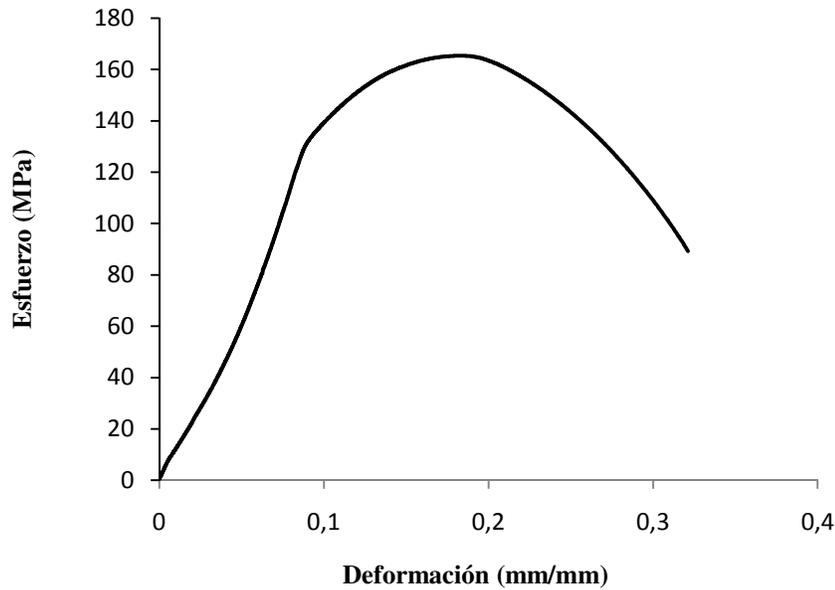
Ahora se determinarán los valores de deformación unitaria a partir de los valores de alargamiento, como se muestra a continuación:

Para obtener la deformación unitaria se aplica la ecuación 2.2 de la siguiente manera:

$$e = \frac{L_F - L_o}{L_o}$$

Siendo todo el término del numerador el alargamiento de la probeta y  $L_o$  la longitud calibrada inicial de la misma.

Realizando todas estas operaciones con cada uno de los puntos de la curva carga vs alargamiento, se obtiene la gráfica esfuerzo vs deformación ingenieril, a continuación se muestra la curva obtenida:



**Figura 3.9** Gráfica de esfuerzo Vs deformación ingenieril.

Una vez obtenidas estas curvas se pueden obtener los valores característicos de la misma, primero se determina el esfuerzo de fluencia empleando el método offset al 0,2%, que consiste en trazar una línea recta paralela a la zona elástica de la gráfica esfuerzo vs deformación a una deformación de 0,002 mm/mm, de esta manera el punto donde esa recta corte a la curva es el esfuerzo de fluencia.

Además del esfuerzo de fluencia ( $S_y$ ), a partir de este ensayo también se obtendrán la resistencia última a la tracción ( $S_u$ ), la cual se identifica por ser el valor máximo de esfuerzo de dicha curva.

Por último, se determinará la ductilidad del metal, la cual se calcula en función del alargamiento a la ruptura, al final de cada ensayo se midió la longitud final uniendo las dos partes fracturadas y registrando la distancia que hay entre los límites de la longitud calibrada. El porcentaje de alargamiento se determina empleando la ecuación 2.5:

$$\% \text{alargamiento} = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100\%$$

#### 3.1.4.2 Ensayos de torsión

El ensayo de torsión se efectuó en la máquina de torsión que pertenece al Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, la cual se observa en la figura 3.9. Se ensayaron probetas para torsión de Aluminio 6063 con la dimensión y forma mostradas en la figura 3.2, la forma y las dimensiones se tomaron de la norma COVENIN 907:1997, referente al diámetro y longitud calibrada.

Para cada condición de tratamiento térmico se realizaron siete (7) ensayos, en este ensayo se logró que la probeta fracture mediante la aplicación de un esfuerzo cortante, el momento torsor es aplicado por la mordaza giratoria de la máquina de torsión, la cual gira a una velocidad de 1 rev/min constante (tomada a partir de revisiones bibliográficas realizadas), este par torsor comenzó a deformar a las probetas ya que la otra mordaza permanecía fija, creándose así un giro de la mordaza con respecto al eje longitudinal de la probeta. Los valores de carga que se aplicaron en este ensayo se obtuvieron por medio de una celda de carga acoplada a la máquina, la cual presenta una interfase a un computador y gráfica en tiempo real la curva de momento torsor vs el ángulo de deformación.

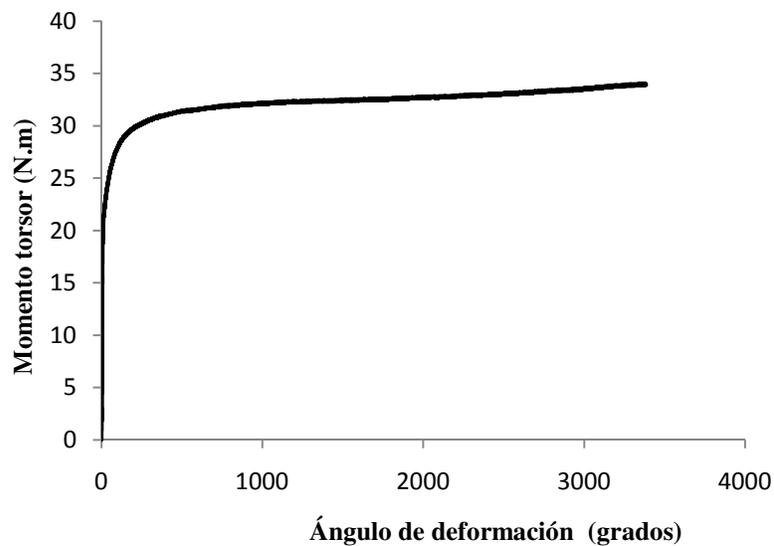
Una vez realizados dichos ensayos es necesario aplicar las ecuaciones mostradas en el Capítulo II, con el objetivo de transformar la curva arrojada por la máquina.

La forma que presenta la curva transformada es muy similar a la curva esfuerzo vs deformación mencionada en el Capítulo II, la cual está compuesta por una zona elástica que no es más que la zona en donde los esfuerzos son proporcionales a las deformaciones, siendo el punto final de dicha zona elástica el límite de proporcionalidad; luego de este punto comienza la transición entre la zona elástica y la zona plástica, zona en la cual se encuentra un punto muy representativo de la curva que es el llamado esfuerzo de fluencia, punto en el cual el material comienza a fluir, luego de este punto la zona plástica continua hasta la fractura del material, trayectoria

en la cual se determina otro punto importante de la curva como lo es el esfuerzo último del material.

Para este caso se mostrará el procedimiento para realizar la transformación de la curva momento torsor vs ángulo de deformación a esfuerzo de corte vs deformación angular, así como la obtención de los valores característicos de dicha curva.

A continuación se muestra la curva arrojada por la máquina:



**Figura 3.10** Gráfica de momento torsor vs ángulo de deformación.

Para obtener la deformación angular en la zona elástica se aplica la ecuación 2.16, de la siguiente forma:

$$\varphi R = \gamma L$$

De dicha ecuación la deformación será:

$$\gamma = \frac{\varphi \cdot R}{L}$$

Siendo  $\gamma$  la deformación angular, R el radio de la probeta,  $\varphi$  el ángulo de giro de la probeta y L la longitud calibrada de la misma.

Para obtener el esfuerzo de corte en la zona elástica se aplica la ecuación 2.11, 2.12 y 2.13, de la siguiente forma:

$$W_p = \frac{1}{R} I_{\text{polar}}$$

Donde  $W_p$  es el módulo resistente a torsión, R es el radio de la probeta e  $I_{\text{polar}}$  es la inercia polar de la sección que se calcula de la siguiente manera:

$$I_{\text{polar}} = \frac{1}{32} \pi d^4 = \frac{1}{2} \pi R^4$$

Una vez obtenido este valor se sustituye en la ecuación 2.11 de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{M_t}{W_p}$$

Para obtener los valores de deformación angular y esfuerzo de corte para la zona plástica se aplicarán las ecuaciones necesarias.

Al superar el límite elástico del material, las tensiones de corte de la probeta no son proporcionales a la distancia al centro de la misma (Tassoni, 2005), no obstante se sigue cumpliendo que:

$$\gamma = \frac{\varphi \cdot R}{L}$$

Para determinar el esfuerzo de corte en la zona plástica se emplea la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{1}{2\pi \cdot r^3} (n \cdot M_t + 3 \cdot M_t)$$

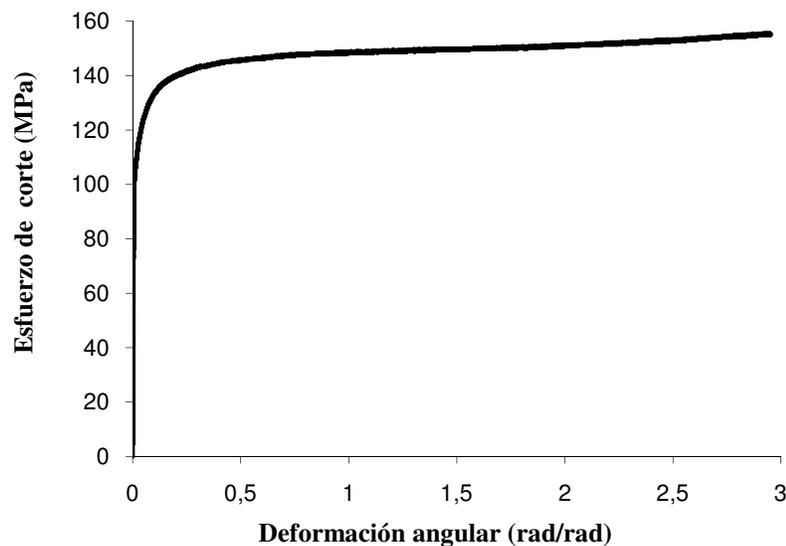
Donde  $r$  es el radio de la probeta,  $n$  es el coeficiente de endurecimiento por deformación y  $M_t$  es el momento torsor. A continuación se describe el procedimiento para determinar el coeficiente de endurecimiento por deformación.

Este coeficiente se obtiene graficando los puntos pertenecientes a la zona plástica de la curva de momento torsor vs ángulo de deformación (Divo y Kirchoff, 2006) esta curva debe seguir una ley potencial, como la que se muestra a continuación:

$$M = M_0 \cdot \theta_L^n$$

Siendo  $n$  el coeficiente de endurecimiento por deformación, que se obtiene aplicando el método de los mínimos cuadrados al conjunto de puntos pertenecientes a la zona plástica, obteniendo así la curva potencial que más se ajusta a ese conjunto de puntos, con su respectiva ecuación y coeficiente de correlación. El software empleado para realizar estas operaciones fue Microsoft Excel 2007 ®.

Realizando todas estas operaciones con cada punto de la gráfica de momento torsor vs ángulo de giro, se obtiene la curva de esfuerzo de corte vs deformación angular que se muestra a continuación:



**Figura 3.11** Gráfica de esfuerzo de corte Vs deformación angular.

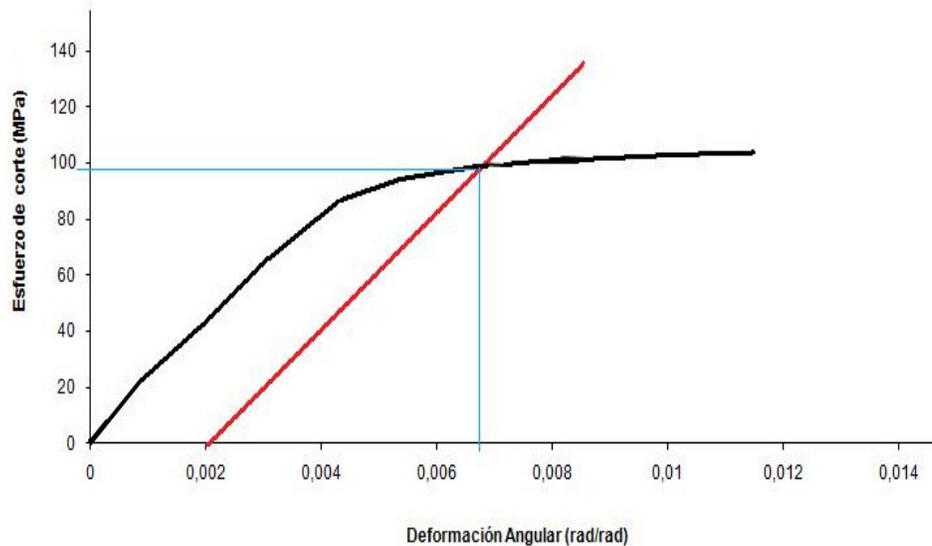
Una vez obtenida esta curva se pueden obtener todos los valores característicos de la misma tales como: límite de proporcionalidad, esfuerzo de fluencia, esfuerzo último, entre otros.

Para obtener el límite de proporcionalidad se traza una recta sobre la zona elástica de la curva, siendo el punto donde estas dos rectas se separan, el límite de proporcionalidad.

A partir de la obtención del límite de proporcionalidad se puede determinar el módulo de corte, calculando la pendiente de la recta en la zona elástica hasta el límite de proporcionalidad, empleando la ecuación 2.17, cabe destacar que la obtención del módulo de elasticidad de esta forma es imprecisa ya que la máquina de torsión no está diseñada para arrojar con tanta precisión el ángulo de giro de la probeta en la zona elástica de la misma además que las deformaciones plásticas se alcanzan rápidamente, para obtener este valor se necesita un equipo especial que mida de forma precisa todos los desplazamientos angulares de la probeta en el rango elástico, tal como un sensor de contacto.

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

Para obtener el esfuerzo de fluencia, se aplica el método del offset, trazando una recta paralela a la zona elástica que corte al eje de las abscisas en 0,002 rad/rad, en el punto en que esta recta corte a la curva esfuerzo de corte vs deformación angular, se obtiene el esfuerzo de fluencia y la deformación elástica. También se puede obtener el esfuerzo último de corte, es decir el esfuerzo para el cual se produce la fractura de la probeta.



**Figura 3.12** Ubicación del esfuerzo de Fluencia.

#### 3.1.4.3 Ensayos de dureza

Para llevar a cabo estos ensayos, fue necesario que la superficie de la probeta se encontrará libre de óxidos, partículas extrañas, razón por la cual se lijaron las probetas con lijas de diferentes denominaciones, tales como: 220, 400, 600 y 1200 en ese orden respectivamente.

Los ensayos de dureza para las distintas condiciones en las cuales se encuentra la aleación, fueron realizados en el durómetro digital Rockwell (ver figura 3.17), marca Buehler ubicado en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería, utilizando la escala Rockwell Superficial 15-T, con una carga de 60 Kg y un indentador de bola.

Otro equipo utilizado fue el durómetro Brinell (ver figura 3.18) estándar ubicado en el Laboratorio de pruebas de la empresa PC PISTON localizada en la Zona Industrial de Valencia, Edo. Carabobo. En los casos donde se requirió realizar algún tipo de conversión de escalas de dureza se empleó la norma E0140-05E01.

### 3.1.5 Macroscopía

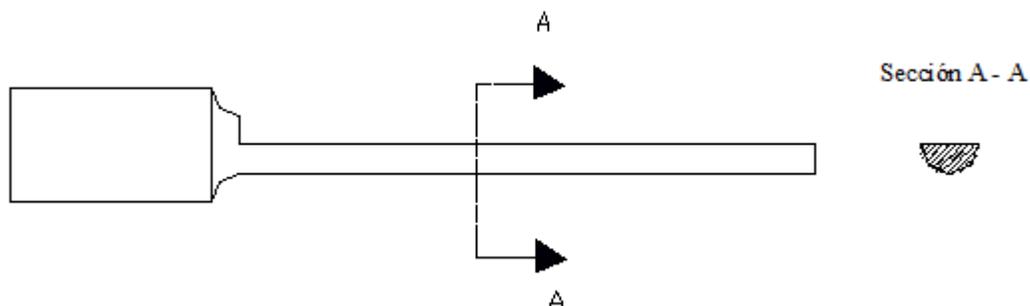
Este análisis se realizó después de efectuar los ensayos de torsión con la finalidad de obtener el comportamiento de las líneas de fluencia del material ensayado una vez aplicada la torsión, en donde, se prepararon cuatro probetas (una por cada tratamiento térmico), en condición de fractura después del ensayo de torsión.

Se realizó un corte transversal de las probetas, luego se efectuó el proceso de preparación metalográfica de la superficie, establecido por la norma ASTM E3. Esta preparación consistió en realizar el lijado de la superficie con lijas de diferentes denominaciones en orden creciente, de manera de eliminar cualquier tipo de imperfecciones en la superficie, una vez culminado este proceso se procedió a realizar el desbaste grueso y fino con los paños y el elemento abrasivo correspondiente para cada uno, alúmina gruesa para el pulido grueso y sílica coloidal para el pulido fino.

Para realizar el macroataque se utilizó el reactivo sugerido por la norma ASTM E 0340-00R06, para macroataques en aleaciones de aluminio, el reactivo recibe el nombre de Tucker's y está compuesto por 45 mL de ácido clorhídrico (HCl), 15 mL de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), 15 mL de ácido fluorhídrico (HF) y 25 mL de agua destilada (H<sub>2</sub>O).

El ataque se llevó a cabo por un intervalo de tiempo de 15 segundos para luego lavar la superficie con abundante agua y secar. Una vez realizada la macroscopía se apreció la superficie para realizar las observaciones pertinentes.

En la siguiente figura se muestra el corte transversal de la probeta



**Figura 3.13** Corte transversal en las probetas de torsión.

### 3.1.6 Microscopia Óptica

Esta prueba se efectuó después de realizar los ensayos de torsión con la finalidad de obtener una información más precisa acerca de la estructura metalográfica de la aleación luego de haberse sometido a dichas condiciones, al igual que en la macroscopía, se prepararon cuatro probetas (una por cada tratamiento térmico), en condición de fractura después del ensayo de torsión.

Para la aplicación de esta prueba se empleó la misma superficie generada para realizar la macroscopía, superficie que se obtuvo mediante un corte longitudinal a las probetas de torsión, como se muestra en la figura 3.13. Esta superficie fue pasada nuevamente por los paños grueso y fino empleando alúmina gruesa y sílica coloidal respectivamente.

Para realizar el microataque se empleó el reactivo sugerido por la norma ASTM E407, el cual está compuesto por: 2 mL de HF, 3 mL HCl, 5 ml HNO<sub>3</sub> y 190 mL H<sub>2</sub>O. Este ataque se llevó a cabo por un tiempo de 20 s sugerido por la norma, para luego lavar con abundante agua y secar. Posteriormente se hizo uso de un microscopio de aumento 20X y 40X en el objetivo para apreciar la microestructura de la aleación.

Una vez que se realizó la visualización de las superficies se procedió a realizar con la ayuda del microscopio óptico el conteo porcentual del área de las fases presentes en la microestructura, empleando el software Buehler Omnimet®, que consiste en aplicar una coloración específica para la diferenciación de las fases presentes en la microestructura, con la finalidad de observar la influencia de los tratamientos térmicos en las fases presentes en la aleación.

### 3.1.7 Medición de la microdureza de las fases presentes en la aleación

Una vez identificadas las fases presentes en el material, se procedió a realizar las mediciones de microdureza, para ello se empleó el microdurómetro Vickers marca Buehler, modelo Identamet, serie 1100) (observar la figura 3.19) disponible en el laboratorio de materiales de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo,

este puede realizar mediciones de Vickers y Knoop. Para llevar a cabo este ensayo se emplearon las probetas provenientes del análisis microscópico, ya que estas se encontraban libre de óxidos y de imperfecciones.

El Identador para medir la dureza Vickers es de diamante, con forma piramidal de base cuadrada y con un ángulo de cúspide de  $(136^\circ)$  y la carga empleada fue (0,01 Kg). (Ver especificaciones tabla 3.4). La microdureza se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$HV = \frac{1,854 * P}{d^2} \quad (3.1)$$

Donde:

HV: Microdureza Vickers.

P: Carga aplicada (Kg).

$d^2$ : Promedio de las diagonales (mm).

### 3.2 Muestras

En este caso la muestra constituye el total de probetas ensayadas, para la validación de los ensayos se emplearán 4 probetas de tracción para cada condición establecida, 7 probetas de torsión para cada condición y 2 probetas de dureza para cada condición, en total fueron 52 probetas.

**Tabla 3.2** Muestra de los ensayos.

Ensayos/Trat. térmicos	Condición inicial (T5)	Recocido (O)	Envejecimiento natural (T4)	Envejecimiento artificial (T6)	Total ensayos
Tracción	4	4	4	4	16
Torsión	7	7	7	7	28
Dureza	2	2	2	2	8
<b>Total</b>	13	13	13	13	52

### 3.3 Método de recolección de datos

La recolección de datos se realizó mediante los ensayos mecánicos como se ha ido explicando a lo largo de este capítulo, para los ensayos de tracción y torsión las máquinas arrojan los resultados gráficos, mediante un software en tiempo real mientras transcurre el ensayo, en donde estos se observan en un monitor conectado a la máquina, y luego, se imprime la data generada por los ensayos como método de recolección.

En los ensayos de dureza, el durómetro Rockwell arroja el valor inmediato de la dureza, el durómetro Brinell Estándar posee un visor con escala graduada que permite medir el diámetro de la huella dejada por el indentador, con estos valores de diámetro de la huella, se determina la dureza, empleando la tabla de valores de dureza Brinell estándar para diferentes diámetros de la huella. Posteriormente se tabuló todos estos valores para finalmente realizar las gráficas correspondientes.

### 3.4 Instrumentos de recolección de datos

A continuación se muestran las máquinas que se emplearon para realizar las actividades necesarias así como sus respectivos datos de placa:

- ✓ *Horno*  
Marca: Thermolyne  
Modelo: Furnace 48000



**Figura 3.14** Horno para tratamientos térmico.

**Tabla 3.3** Especificaciones del horno eléctrico.

<b>Medidas de la cámara (cm)</b>	
Ancho	17,8
Alto	12,7
Profundidad	25,4
<b>Rango de operación de temperaturas (°c)</b>	
Corriente Continua	0 -1093
Corriente Alterna	0 -1200

Fuente: Manual del usuario del horno eléctrico Branstead Thermolyne 48000

✓ *Máquina para ensayo de torsión*

**Figura 3.15** Máquina para ensayo de torsión.

✓ *Máquina universal para ensayos de tracción*

Marca: GALDABINI.

Modelo: CTM 20.

Capacidad: 20 TON.



**Figura 3.16** Máquina universal para ensayos de tracción.

✓ *Durómetro digital Rockwell*

Marca: Buehler

Modelo: Macromet 5100

Capacidad: (15 – 150) Kg



**Figura 3.17** Durómetro Digital Rockwell.

✓ *Durómetro Brinell Estándar*

Marca: Detroit Testing Machine

Modelo: HB 2 - N°943



**Figura 3.18** Durómetro Brinell estándar.

- ✓ *Microdurómetro Vickers*  
Marca: Buehler.  
Modelo: Identamet serie 1100



**Figura 3.19** Microdurómetro Vickers.

**Tabla 3.4** Especificaciones del microdurómetro BUEHLER.

<b>Capacidad</b>	<b>Mínima</b> 0,01 Kg	<b>Máxima</b> 1 Kg
	<b>Tipo</b>	
<b>Escala</b>	Vickers: HV	Knoop: HP
	<b>Ángulo de la cúspide</b>	
<b>Identador</b>	HV= 136° HP (ángulos opuestos 172° – 130°)	

Fuente: Manual del usuario del microdurómetro BUEHLER.

# CAPÍTULO 4

## *Resultados Obtenidos*

---

---

### **4.1 Resultados de la Composición química de la aleación de Aluminio 6063**

A continuación se muestra una tabla que contiene el porcentaje de cada elemento químico que compone la aleación de aluminio 6063:

**Tabla 4.1** Composición química según las especificaciones reales de la aleación de aluminio AA6063.

Silicio	Hierro	Cobre	Magnesio	Manganeso	Cromo	Zinc	Titanio
0,44	0,24	0,020	0,55	0,020	0,02	0,02	0,022

Fuente: Aluminios de Venezuela. C.A Certificado de Calidad. N°7977, Hoja de ruta: 525066

### **4.2 Resultados de los Ensayos de Tracción**

A continuación se muestran los resultados obtenidos a tracción para la condición de entrega (T5), y para los tres tratamientos térmicos aplicados, recocido (O), endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4) y artificial (T6).

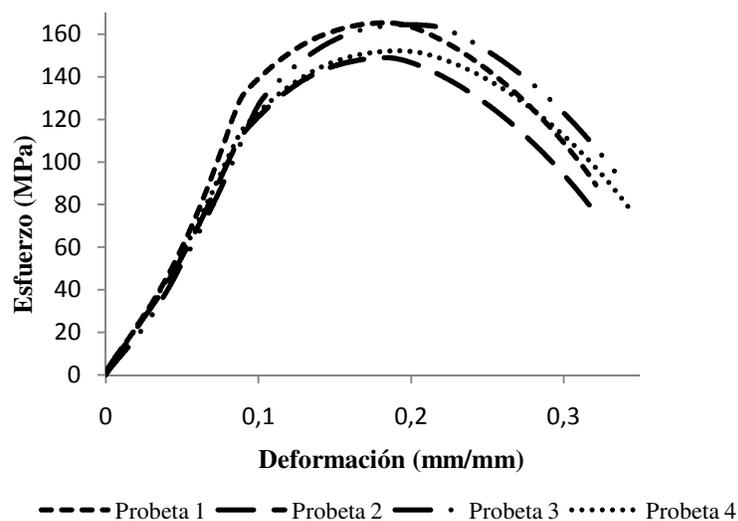
### 4.2.1 Resultados de los ensayos de tracción en condición de entrega (T5)

La tabla 4.2 muestra un resumen de todos los valores obtenidos para la condición de entrega, esta tabla contiene todos los promedios de cada una de las propiedades de manera de obtener un valor representativo de cada propiedad para así poder compararlas con los valores recomendados por la norma correspondiente.

**Tabla 4.2** Resumen de las propiedades obtenidas de la gráfica esfuerzo vs deformación ingenieril para las cuatro (4) probetas en condición de entrega.

Propiedades	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Promedio	Desviación estándar
<b>Esfuerzo de fluencia (MPa)</b>	135,34	121,16	137,54	121,03	128,77	8,905
<b>Resistencia última a la tracción (MPa)</b>	165,36	148,98	164,23	152,27	157,71	8,30
<b>% de Alargamiento a la ruptura</b>	21,25	23,22	18,89	25,98	22,33	3,00

El siguiente gráfico muestra las cuatro curvas de esfuerzo deformación ingenieril obtenidas en los ensayos de tracción para la condición de entrega (T5):



**Figura 4.1** Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril de las cuatro (4) probetas de condición de entrega (T5).

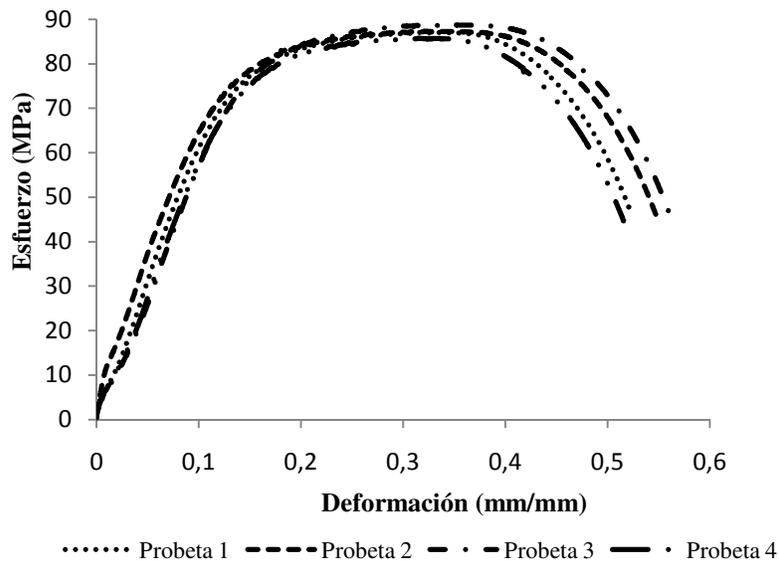
### 4.2.2 Resultados de los ensayos de tracción en recocido (O)

A continuación se muestra una tabla resumen que contiene todos los resultados obtenidos a tracción para las probetas sometidas a un tratamiento térmico de recocido (O):

**Tabla 4.3** Resumen de las propiedades obtenidas de la gráfica esfuerzo vs deformación ingenieril para las cuatro (4) probetas en condición de recocido (O).

Propiedades	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Promedio	Desviación estándar
<b>Esfuerzo de fluencia (MPa)</b>	58,12	53,05	59,92	59,51	57,65	3,16
<b>Resistencia última a la tracción (MPa)</b>	86	87,32	88,33	87,01	87,17	0,96
<b>% de Alargamiento a la ruptura</b>	35,43	39,76	33,07	36,61	36,21	2,78

El siguiente gráfico muestra las cuatro curvas de esfuerzo deformación ingenieril obtenidas en los ensayos de tracción para la condición de recocido (O):



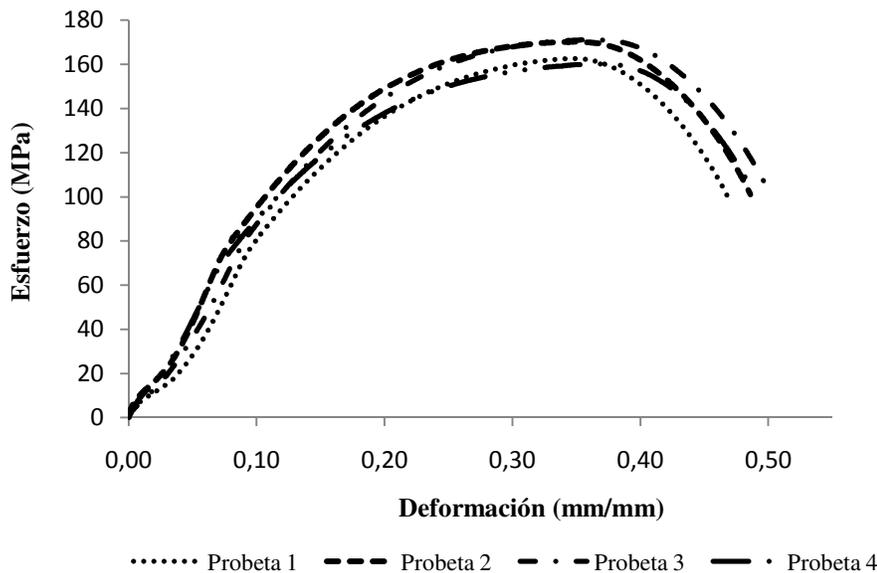
**Figura 4.2** Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril de las cuatro (4) probetas en condición de recocido (O).

### 4.2.3 Resultados de los ensayos de tracción para el tratamiento de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)

A continuación se muestra una tabla resumen que contiene todos los resultados obtenidos a tracción para las probetas sometidas a un tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4):

**Tabla 4.4** Resumen de las propiedades obtenidas de la gráfica esfuerzo vs deformación ingenieril para las cuatro (4) probetas en condición Endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4).

Propiedades	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Promedio	Desviación estándar
Esfuerzo de fluencia (MPa)	84,93	81,43	83,83	84,29	83,62	1,53
Resistencia última a la tracción (MPa)	162,15	170,03	171,13	160,00	165,83	5,57
% de Alargamiento a la ruptura	27,55	37,00	34,44	23,22	30,55	6,31



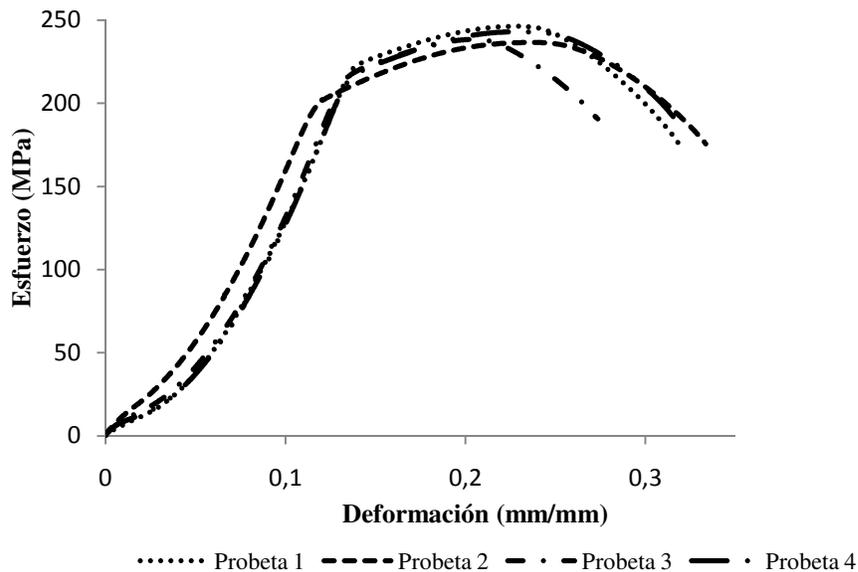
**Figura 4.3** Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril de las cuatro (4) probetas en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4).

**4.2.4 Resultados de los ensayos de tracción para el tratamiento de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)**

A continuación se muestra una tabla resumen que contiene todos los resultados obtenidos a tracción para las probetas sometidas a un tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6):

**Tabla 4.5** Resumen de las propiedades obtenidas de la gráfica esfuerzo vs deformación ingenieril para las cuatro (4) probetas en condición endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6).

Propiedades	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Promedio	Desviación estándar
<b>Esfuerzo de fluencia (MPa)</b>	226,60	207,04	219,64	216,81	217,52	8,11
<b>Resistencia última a la tracción (MPa)</b>	246,01	236,03	238,01	243,02	240,77	4,57
<b>% de Alargamiento a la ruptura</b>	25,98	20,47	18,89	19,29	21,57	3,28



**Figura 4.4** Gráfica de esfuerzo vs deformación ingenieril de las cuatro (4) probetas en condición de envejecido artificial (T6).

### 4.3 Resultados de los ensayos de dureza

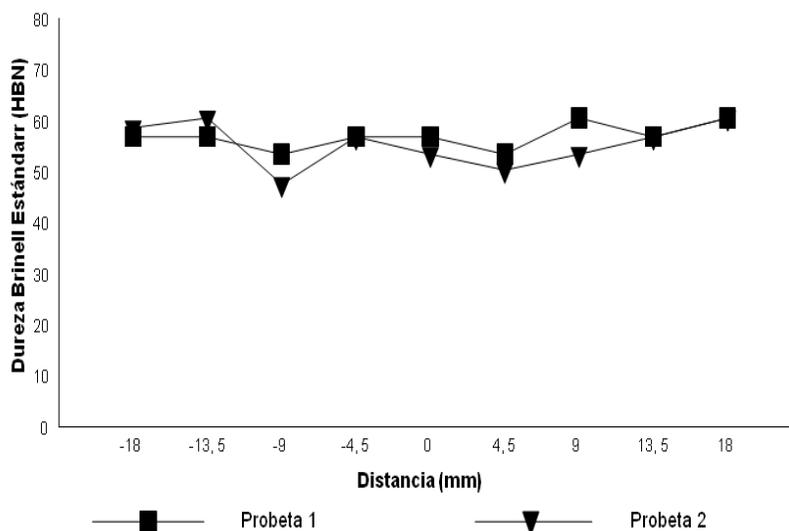
A continuación se presentan los resultados obtenidos para los ensayos de dureza de las muestras en condición de entrega (T5), recocido (O), endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4) y artificial (T6).

#### 4.3.1 Resultados del ensayo de dureza en condición de entrega (T5)

Para obtener los valores de dureza en esta condición se empleó el durómetro Brinell disponible en la empresa manufacturera de pistones PC PISTONS ubicada en Valencia, Edo. Carabobo. Los resultados obtenidos en dicha condición se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 4.6** Resultados del ensayo de dureza Brinell estándar (HBN) para la condición de entrega (T5).

Probeta	Distancia (mm)									Promedio (HBN)
	18	13,5	9	4,5	0	4,5	9	13,5	18	
1	56,8	56,8	53,4	56,8	56,8	53,4	60,5	56,8	60,5	56,8
2	58,6	60,5	47,5	56,8	53,4	50,3	53,4	56,8	60,5	55,3
<b>Promedio</b>										56,1
<b>Desviación</b>										3,52



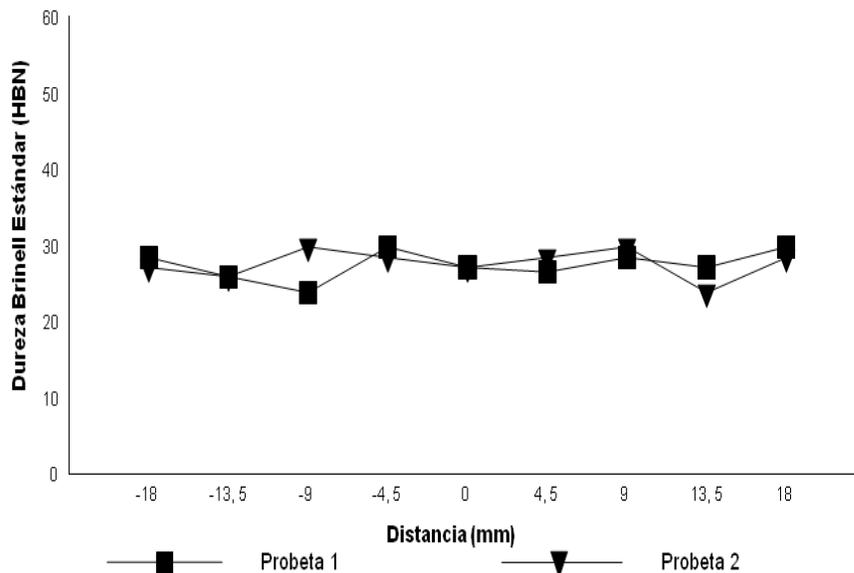
**Figura 4.5** Gráfica del ensayo de dureza Brinell estándar en condición de entrega (T5).

### 4.3.2 Resultados del ensayo de dureza en condición de recocido (O)

El ensayo se efectuó en la escala de dureza Brinell estándar en cada una de las dos probetas, se aplicaron 9 ensayos de dureza distribuidos de manera uniforme una línea imaginaria que va de un extremo a otro. Los resultados se muestra en la tabla siguiente:

**Tabla 4.7** Resultados del ensayo de dureza Brinell estándar para la condición de recocido (O).

Probeta	Distancia (mm)									Promedio (HBN)
	18	13,5	9	4,5	0	4,5	9	13,5	18	
1	28,4	25,9	23,8	29,8	27,1	26,5	28,4	27,1	29,8	27,45
2	27,1	25,9	29,8	28,4	27,1	28,4	29,8	23,8	28,4	27,60
<b>Promedio</b>										27,5
<b>Desviación</b>										1,81



**Figura 4.6** Gráfica del ensayo de dureza Brinell estándar en condición de recocido (O).

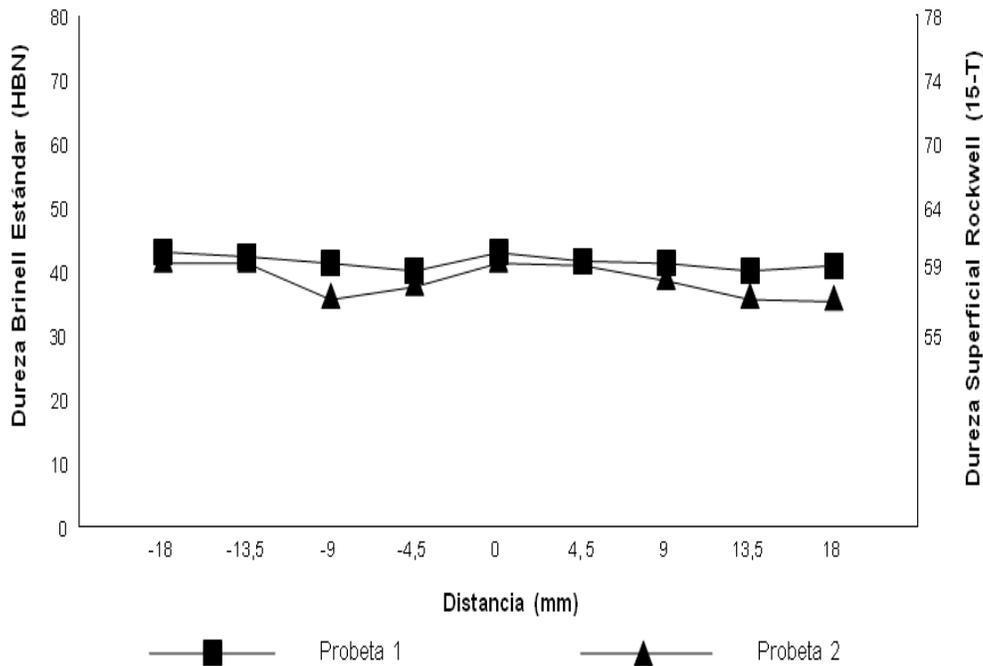
### 4.3.3 Resultados del ensayo de dureza en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)

La medición se efectuó en la escala de dureza Rockwell (15-T) en cada una de las dos probetas, se aplicaron 9 ensayos de dureza distribuidos de manera uniforme en

una línea imaginaria que va de un extremo a otro de la probeta. Los resultados se muestra en la tabla siguiente:

**Tabla 4.8** Resultados del ensayo de dureza superficial Rockwell (15-T) para la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4).

Probeta	Distancia (mm)										Promedio (HR 15-T)	Promedio HBN
	18	13,5	9	4,5	0	4,5	9	13,5	18			
1	60,7	60,3	59,7	59,0	64,3	59,9	59,7	59,0	59,5	60,2	42,1	
2	59,7	59,7	56,3	57,5	59,7	59,5	58,1	56,3	56,1	58,1	38,5	
<b>Promedio</b>											59,2	40,3
<b>Desviación</b>											1,85	3,22



**Figura 4.7** Gráfica del ensayo de dureza en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4).

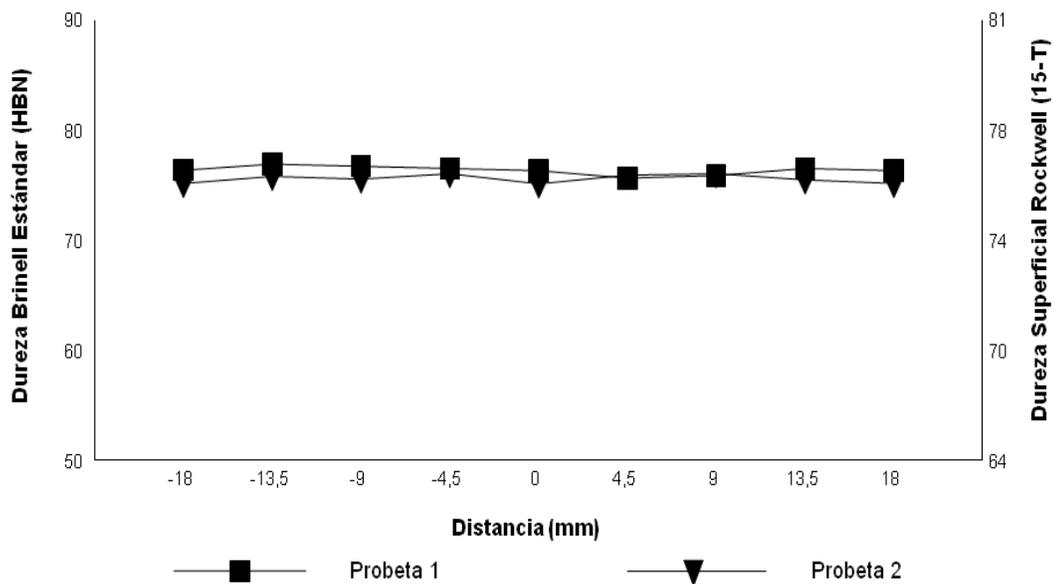
#### 4.3.4 Resultados del ensayo de dureza en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)

La medición se efectuó en la escala de dureza Rockwell (15-T) en cada una de la dos probetas, se aplicaron nueve (9) indentaciones por cada una de la dos probetas,

dichas mediciones se realizaron sobre una línea radial imaginaria que va de extremo a extremo de la probeta. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 4.9** Resultados del ensayo de dureza superficial Rockwell 15-T para la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6).

Probeta	Distancia (mm)										Promedio (HR 15-T)	Promedio HBN
	18	13,5	9	4,5	0	4,5	9	13,5	18			
1	75,7	77,1	76,6	76,1	75,6	73,9	74,5	76,1	75,6	75,6	76,3	
2	72,7	74,3	73,7	74,9	72,6	74,6	74,9	73,5	72,7	73,7	75,5	
<b>Promedio</b>											74,7	75,9
<b>Desviación</b>											1,32	0,53



**Figura 4.8** Gráfica del ensayo de dureza en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6).

#### 4.4 Resultados de los ensayos de torsión

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los ensayos de torsión para la condición de entrega (T5), recocido (O), endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4) y artificial (T6).

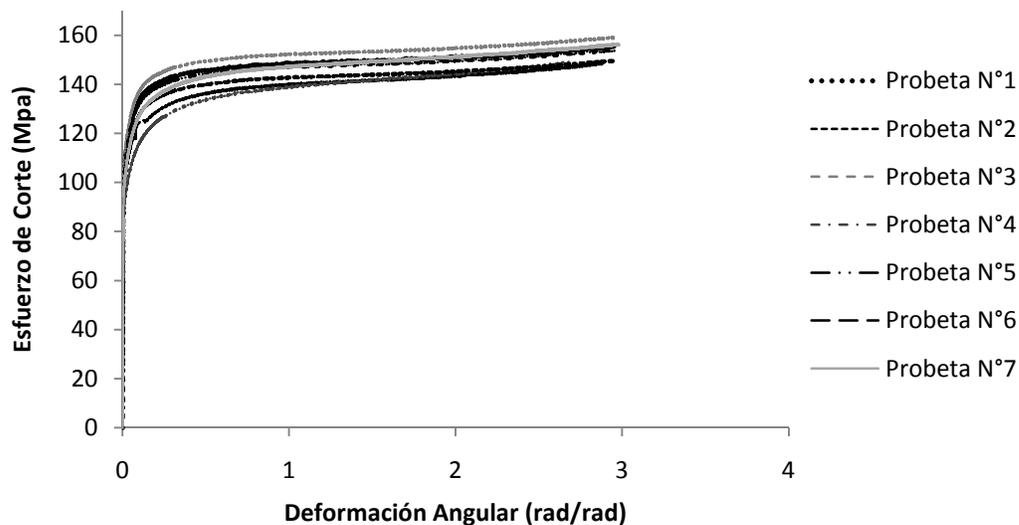
#### 4.4.1 Resultados de los ensayos de torsión para la condición de entrega (T5)

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las propiedades obtenidas para cada probeta en condición de entrega T5:

**Tabla 4.10** Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de torsión en condición de entrega T5.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7
Coef. de end. por deformación (n)	0,069	0,086	0,068	0,098	0,067	0,068	0,086
Coefficiente de correlación ( $R^2$ )	0,881	0,946	0,879	0,967	0,882	0,883	0,924
Esfuerzo último, $\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	155,49	148,78	159,26	148,95	153,04	149,77	156,47
Deformación angular a la rotura, $\gamma_{\text{máx}}$ (rad/rad)	2,953	2,878	2,954	2,683	2,953	2,955	2,9819
Módulo de corte, G (GPa)	17,65	16,62	17,96	13,96	18,39	16,67	14,13
Esfuerzo de fluencia, $\tau_v$ (MPa)	98,79	92,13	100,07	88,91	103,20	95,17	95,32

El siguiente gráfico muestra las siete (7) curvas de esfuerzo de corte vs deformación angular obtenidas en los ensayos de torsión para la condición de entrega (T5):



**Figura 4.9** Gráfica de esfuerzo de corte Vs deformación angular de las siete (7) probetas en condición de entrega T5.

A continuación se muestra la condición de la probeta N°1 luego del ensayo de torsión, la línea roja que se muestra en la figura 4.10 al inicio del ensayo era una línea recta de extremo a extremo, al finalizar el ensayo la línea representa el número de vueltas que dió la probeta.



**Figura 4.10** Condición de la probeta N° 1 una vez finalizado el ensayo.

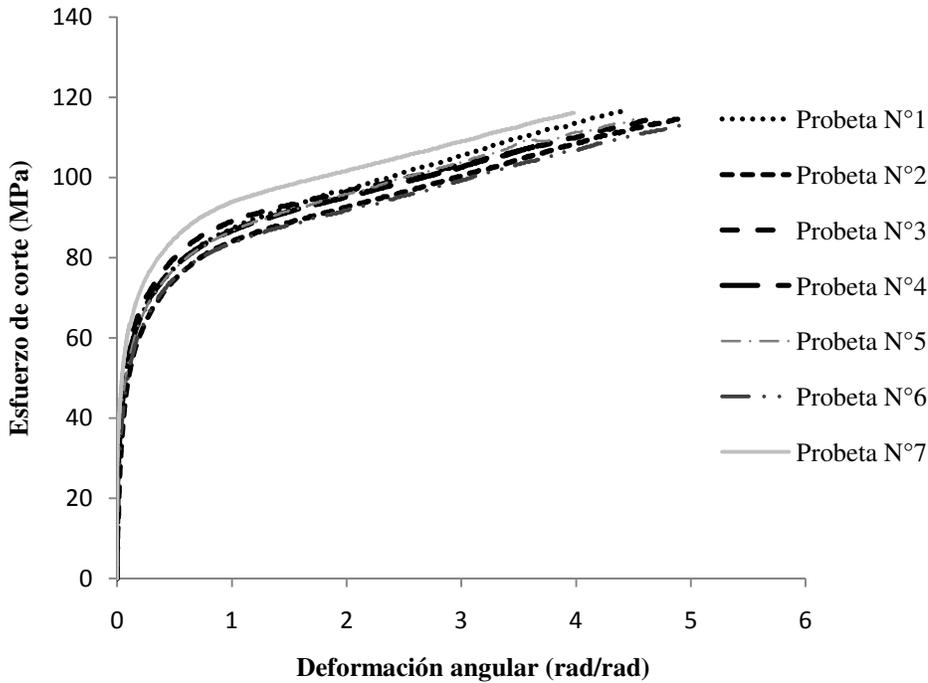
#### 4.4.2 Resultados de los ensayos de torsión para el tratamiento térmico de recocido (O)

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las propiedades obtenidas para cada probeta en condición de recocido (O):

**Tabla 4.11** Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de torsión en condición de recocido (O).

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7
Coef. de end. por deformación, $n$	0,227	0,219	0,199	0,196	0,231	0,241	0,209
Coefficiente de correlación ( $R^2$ )	0,995	0,964	0,957	0,972	0,994	0,986	0,976
Esfuerzo último, $\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	116,92	114,84	115,02	107,69	114,54	113,21	116,15
Deformación angular a la rotura, $\gamma_{\text{máx}}$ (rad/rad)	4,446	4,918	4,753	3,628	4,499	4,913	3,981
Módulo de corte, $G$ (GPa)	2,83	1,10	3,93	2,58	7,29	4,07	6,19
Esfuerzo de fluencia, $\tau_v$ (MPa)	30,61	26,69	28,35	30,65	25,96	23,41	33,74

El siguiente gráfico muestra las siete (7) curvas de esfuerzo de corte vs deformación angular obtenidas en los ensayos de torsión para la condición de recocido (O):



**Figura 4.11** Gráfica de esfuerzo de corte Vs deformación angular de las siete (7) probetas en condición de recocido (O).

A continuación se muestra la condición de la probeta N° 1 luego del ensayo de torsión:



**Figura 4.12** Condición de la probeta N° 1 una vez finalizado el ensayo.

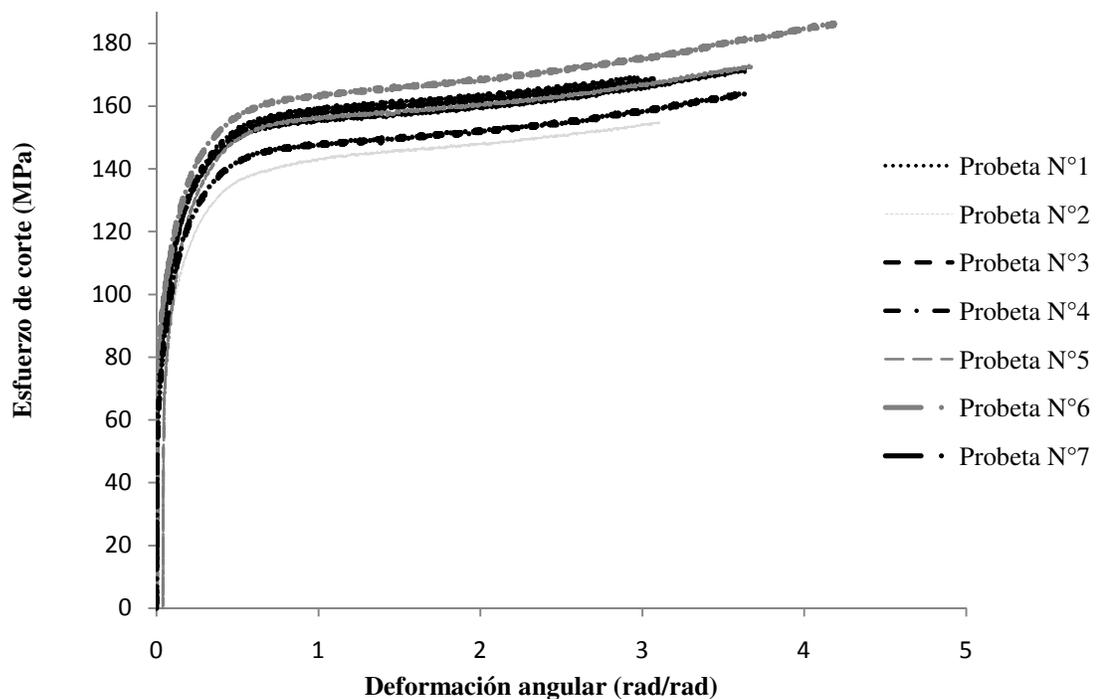
#### 4.4.3 Resultados de los ensayos de torsión para el tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las propiedades obtenidas para cada probeta en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4):

**Tabla 4.12** Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4).

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7
Coef. de end. por deformación, $n$	0,167	0,190	0,171	0,167	0,202	0,158	0,174
Coefficiente de correlación ( $R^2$ )	0,941	0,952	0,938	0,886	0,871	0,967	0,930
Esfuerzo último, $\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	171,78	155,20	168,76	169,37	173,04	186,53	166,08
Deformación angular a la rotura, $\gamma_{m\acute{a}x}$ (rad/rad)	3,638	3,105	3,087	2,969	3,673	4,210	3,630
Módulo de corte, $G$ (GPa)	10,43	8,27	9,93	7,61	10,72	12,83	7,57
Esfuerzo de fluencia, $\tau_y$ (MPa)	64,52	58,25	66,07	67,09	64,93	73,70	60,39

El siguiente gráfico muestra las siete (7) curvas de esfuerzo de corte vs deformación angular obtenidas en los ensayos de torsión para la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4):



**Figura 4.13** Gráfica de esfuerzo de corte Vs deformación angular de las siete (7) probetas en condición de T4.

A continuación se muestra la condición de la probeta N°1 luego del ensayo de torsión:



**Figura 4.14** Condición de la probeta N° 1 una vez finalizado el ensayo.

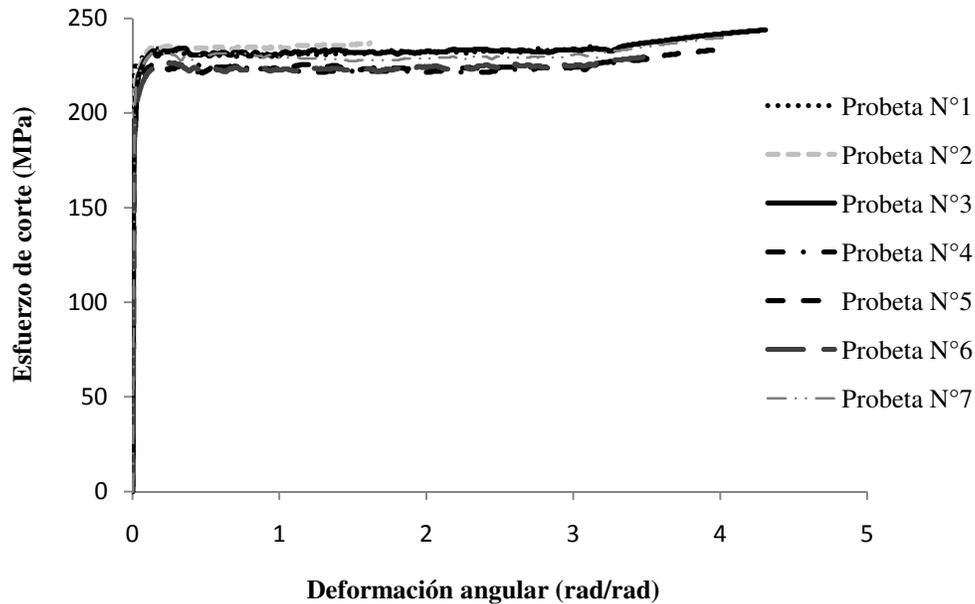
#### 4.4.4 Resultados de los ensayos de torsión para el tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las propiedades obtenidas para cada probeta en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6):

**Tabla 4.13** Resumen de los valores obtenidos para los ensayos de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6).

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7
Coef. de end. por deformación, $n$	0,009	0,098	0,007	0,028	0,014	0,013	0,055
Coefficiente de correlación ( $R^2$ )	0,700	0,634	0,556	0,569	0,643	0,650	0,700
Esfuerzo último, $\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	236,32	234,66	235,16	225,72	235,19	227,34	239,23
Deformación angular a la rotura, $\gamma_{\text{máx}}$ (rad/rad)	3,132	1,618	4,308	3,599	4,003	3,475	4,019
Módulo de corte, $G$ (GPa)	19,96	18,47	17,36	19,35	18,27	18,20	15,67
Esfuerzo de fluencia, $\tau_y$ (MPa)	230,06	203,91	209,49	202,94	203,94	197,98	209,56

El siguiente gráfico muestra las siete (7) curvas de esfuerzo de corte vs deformación angular obtenidas en los ensayos de torsión para la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6):



**Figura 4.15** Gráfica de esfuerzo de corte Vs deformación angular de las siete (7) probetas en condición de T6.

A continuación se muestra la condición de la probeta N°1 luego del ensayo de torsión:



**Figura 4.16** Condición de la probeta N° 1 una vez finalizado el ensayo.

#### 4.5 Aplicación de las relaciones entre las propiedades a tracción y torsión

Una vez obtenidos y tabulados los resultados de los ensayos de tracción y de torsión, se pueden establecer relaciones y comparaciones entre los valores obtenidos en un ensayo y otro mediante la aplicación de los criterios de fluencia tales como: Tensión cortante máxima de Tresca y el de energía máxima de distorsión de Von Mises, así como también se compararan los esfuerzos últimos obtenidos. En las tablas que siguen se pueden observar los valores de las propiedades obtenidas para la aleación de aluminio en las cuatro condiciones de estudio.

**Tabla 4.14** Resumen de valores obtenidos para los ensayos de tracción y torsión.

Propiedad		(T5)	(O)	(T4)	(T6)
Esfuerzo de fluencia (MPa)	$S_y$	128,77	57,65	83,62	217,52
Esfuerzo de fluencia al corte (MPa)	$\tau_y$	96,23	28,48	65,74	208,27
Esfuerzo último a tracción (MPa)	$S_u$	157,71	87,17	165,83	240,77
Esfuerzo último a corte (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$	154,73	113,68	170,78	233,37

La siguiente tabla muestra el resultado de las relaciones entre las propiedades a tracción y torsión, para las distintas condiciones de tratamientos térmicos.

**Tabla 4.15** Relaciones entre el esfuerzo de fluencia en tracción y torsión de la aleación de aluminio AA6063.

Relación	(T5)	(O)	(T4)	(T6)	Criterio de Tresca	Criterio de Von Mises
$S_y / \tau_y$	1,33	2,02	1,27	1,04	2,00	1,732
$S_u / \tau_{m\acute{a}x}$	1,01	0,76	0,97	1,031	-	-

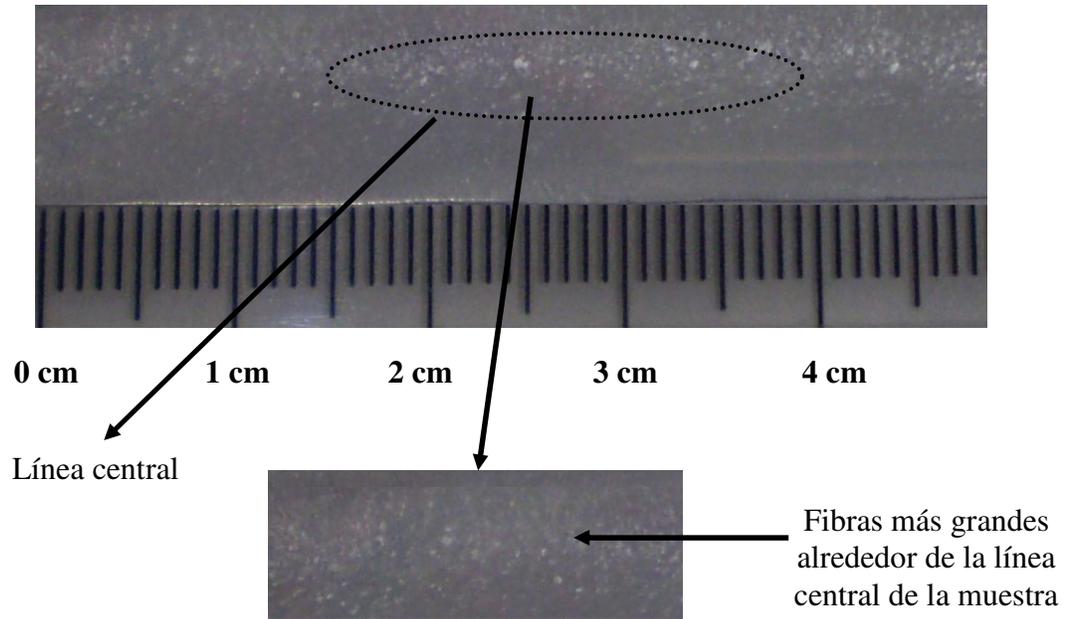
#### 4.6 Macroscopía a muestras provenientes del ensayo de torsión

Una vez realizados los ensayos de torsión y con el objetivo de ver cómo se comportan las líneas de fluencia del material y como quedaron orientados los granos una vez deformadas las muestras, se prepararon cuatro probetas provenientes de dicho ensayo una por cada condición (O, T4, T5 y T6), siguiendo el procedimiento mostrado en el Capítulo III.

A continuación se presentan las imágenes obtenidas en cuanto a la evaluación metalográfica de la aleación estudiada para cada condición de tratamiento térmico, luego de haberse sometido dichas muestras a torsión.

##### 4.6.1 Macroscopía a las muestras en condición de entrega (T5)

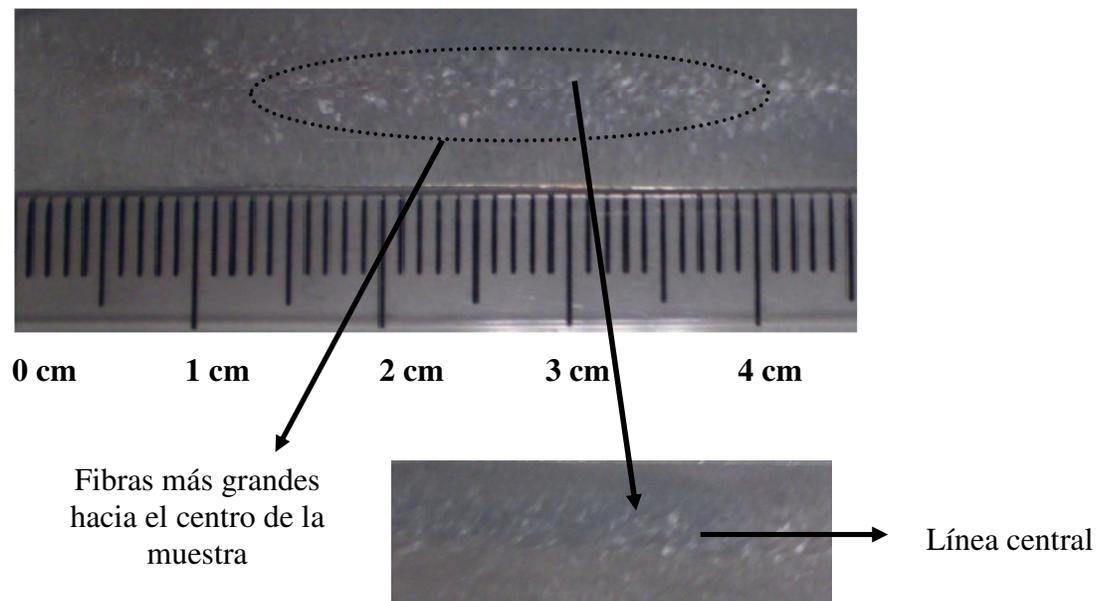
En la siguiente figura se observa una sección longitudinal de la probeta en condición de entrega sometida a torsión, en la cual se puede apreciar la línea central, el tamaño y la orientación de las fibras en la muestra luego de la torsión.



**Figura 4.17** Macroscopía a la probeta de torsión en condición de entrega (T5).

#### 4.6.2 Macroscopía a las muestras en condición de recocido (O)

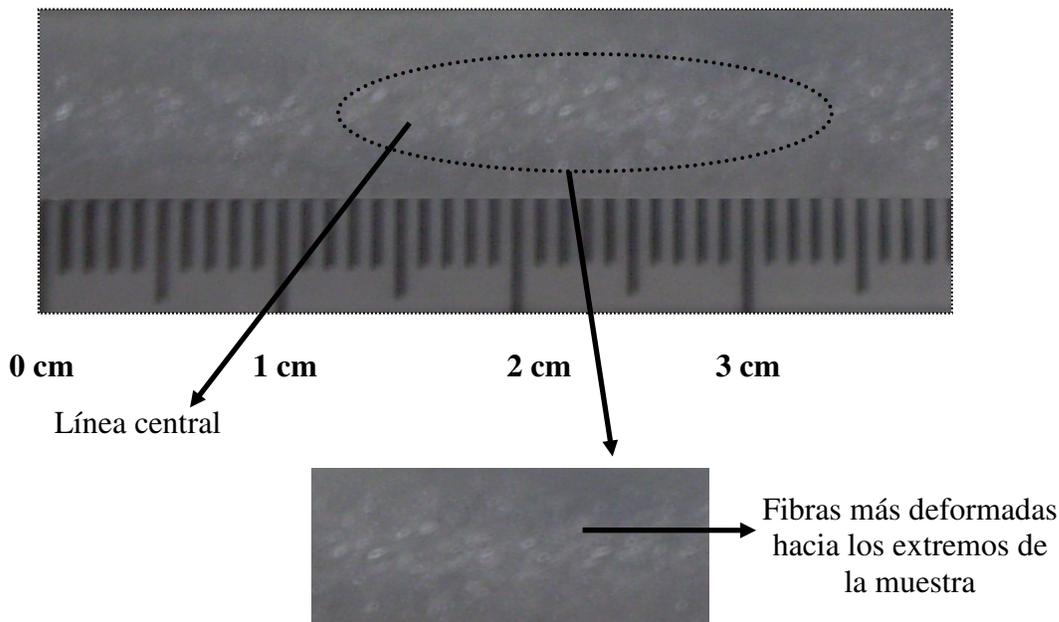
En la siguiente figura se observa una sección longitudinal de la probeta en condición de recocido sometida a torsión, en la cual se puede apreciar la línea central, el tamaño y la orientación de las fibras en la muestra luego de la torsión.



**Figura 4.18** Macroscopía a la probeta de torsión en condición de recocido (O).

#### 4.6.3 Macroscopía a las muestras en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)

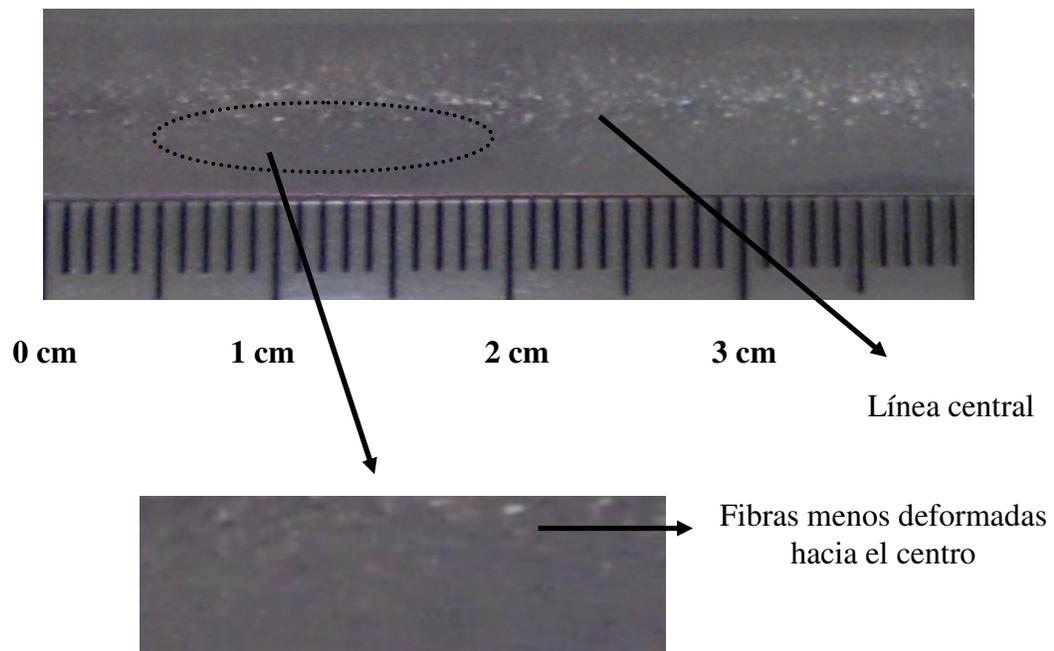
En la siguiente figura se observa una sección longitudinal de la probeta en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4) sometida a torsión, en la cual se puede apreciar la línea central, el tamaño y la orientación de las fibras en la muestra luego de la torsión.



**Figura 4.19** Macroscopía a la probeta de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4).

#### 4.6.4 Macroscopía a las muestras en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)

En la siguiente figura se observa una sección longitudinal de la probeta en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6) sometida a torsión, en la cual se puede apreciar la línea central, el tamaño y la orientación de las fibras en la muestra luego de la torsión.



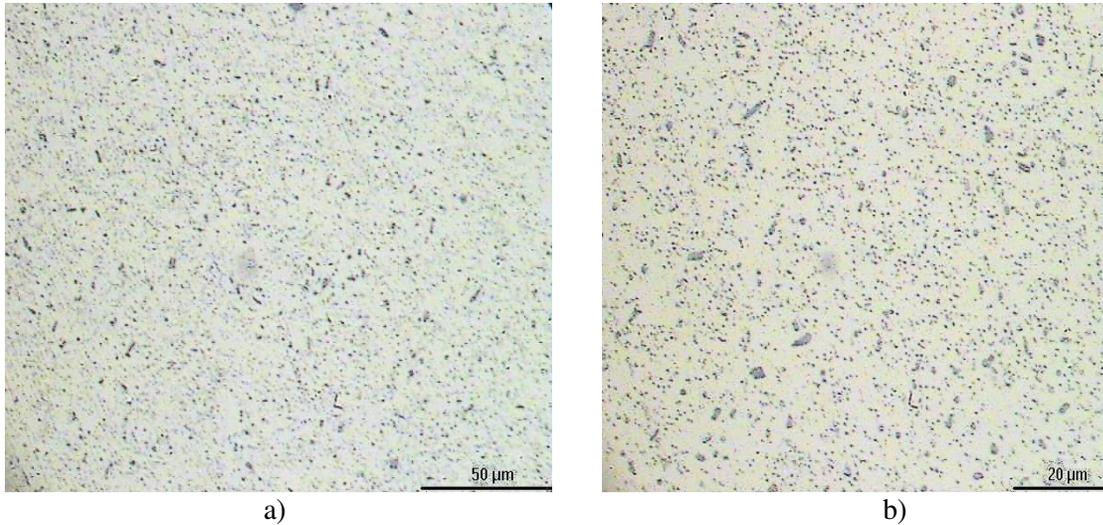
**Figura 4.20** Macroscopía a la probeta de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6).

#### 4.7 Microscopía a muestras provenientes del ensayo de torsión

Una vez realizados los ensayos de torsión y con el objetivo de ver la influencia que tienen en la microestructura de los tratamientos térmicos en la propiedades de torsión, se prepararon cuatro probetas provenientes de dicho ensayo una por cada condición de tratamiento térmica (O, T4, T5 y T6), siguiendo el procedimiento mostrado en el Capítulo III.

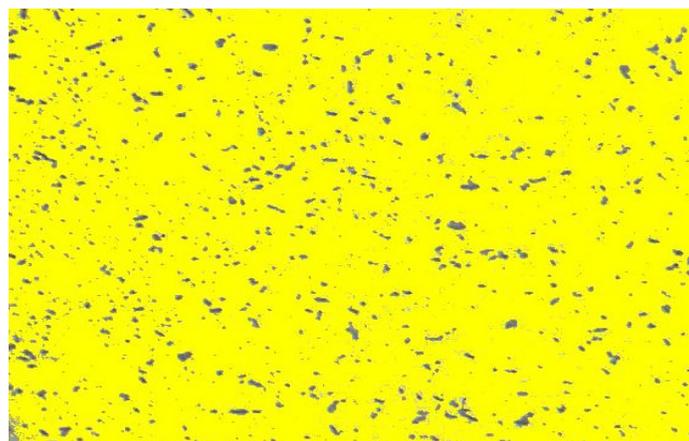
##### 4.7.1 Microscopía a las muestras en condición de entrega (T5)

En la figura 4.21 se observa la microestructura con un aumento de 20X y 40X en la probeta en condición de entrega (T5) sometida a torsión, en la cual se puede apreciar la matriz de aluminio y los precipitados presentes en ella.



**Figura 4.21** Microscopía a la probeta de torsión en condición de entrega (T5), a) 20X y b) 40X.

A continuación se presenta en la tabla 4.16 el área porcentual de las fases de la microestructura matriz de aluminio y los precipitados en la probeta en condición de entrega (T5). En donde el área porcentual de las fases se obtuvo mediante un análisis de imágenes empleando el software Buehler Omnimet<sup>®</sup> especializado para esta aplicación, instalado en el microscopio óptico disponible en el Laboratorio de Materiales del Departamento de Materiales y Proceso de Fabricación de la Universidad de Carabobo. A continuación se muestra un ejemplo en la figura 4.22:



Matriz de Aluminio
  Precipitado ( $Mg_2Si$ )

**Figura 4.22** Medición de área porcentual de las fases para la condición de T5.

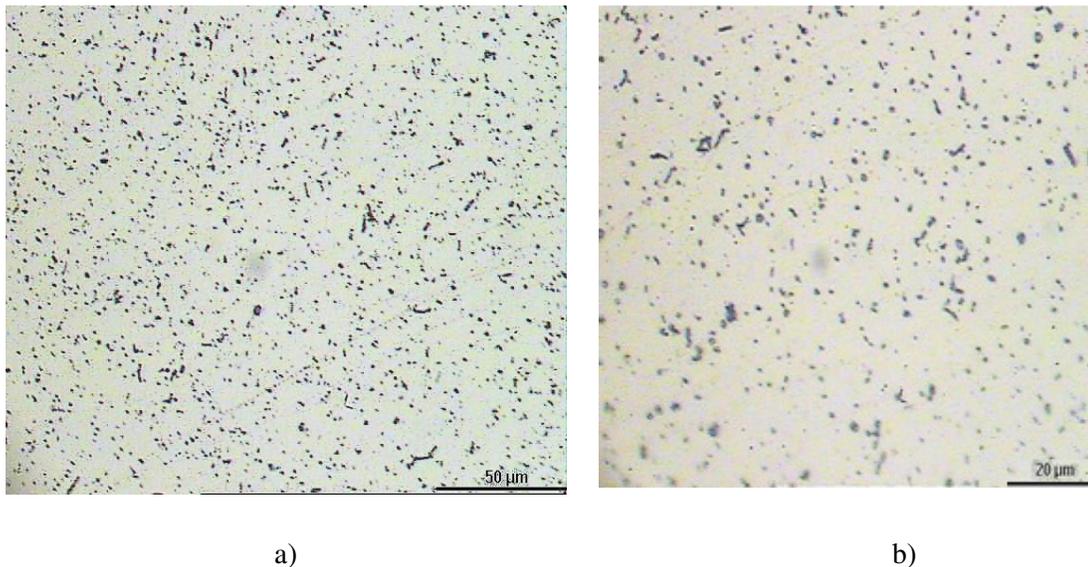
Realizando el procedimiento mencionado anteriormente para la condición de entrega (T5), se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla 4.16** Valores del área porcentual de las fases de la probeta en condición de tratamiento térmico de entrega (T5).

	%Precipitados(Mg <sub>2</sub> Si)	%Matriz de aluminio
Condicion de entrega (T5)	9,97	90,03

#### 4.7.2 Microscopía a las muestras en condición de recocido (O)

En la Figura 4.23 se observa la microestructura con una ampliación de 20X y 40X en la probeta en condición de tratamiento térmico recocido (O) sometida a torsión, en la cual se puede apreciar la matriz de aluminio y los precipitados presentes en ella.



**Figura 4.23** Microscopía a la probeta de torsión en condición de recocido (O), a) 20X y b) 40X.

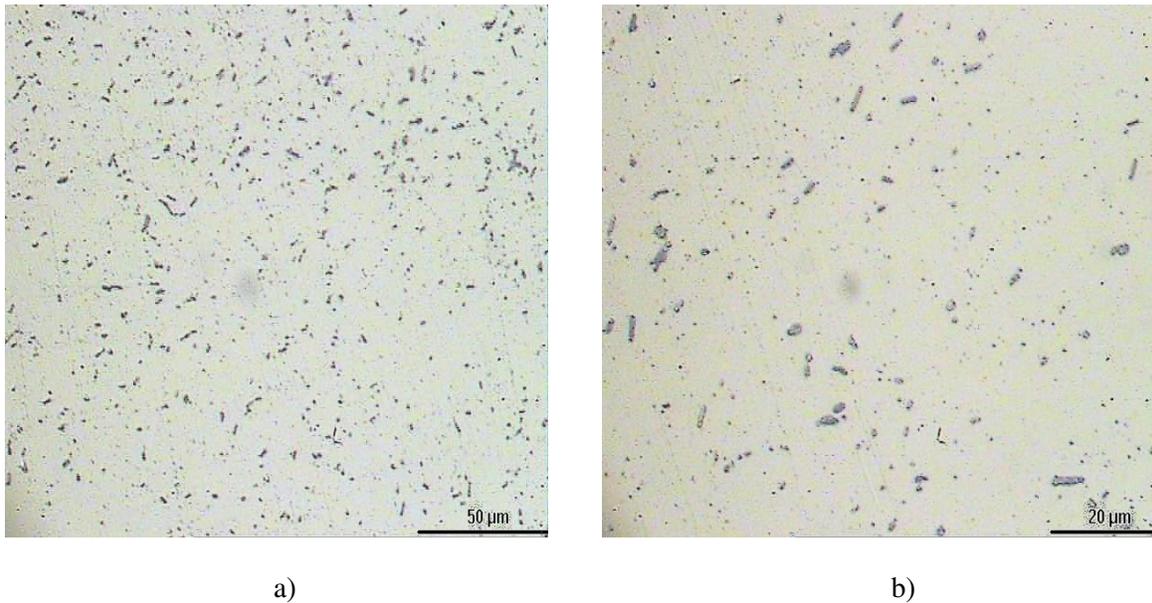
En la tabla 4.17 se presenta el área porcentual de las fases de la microestructura matriz de aluminio y los precipitados en la probeta en condición de tratamiento térmico de recocido (O).

**Tabla 4.17** Valores del área porcentual de las fases de la probeta en condición de tratamiento térmico de recocido (O).

	<b>%Precipitados(Mg<sub>2</sub>Si)</b>	<b>%Matriz de aluminio</b>
<b>Condición recocido (O)</b>	4,17	95,83

### 4.7.3 Microscopía a las muestras en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4)

A continuación se observa en la Figura 4.24 de la microestructura con una ampliación de 20X y 40X la probeta de torsión en condición de tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4) sometida a torsión, en la cual se puede apreciar microscópicamente la matriz de aluminio y los precipitados presentes en ella.



**Figura 4.24** Microscopía a la probeta de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4), a) 20X y b) 40X.

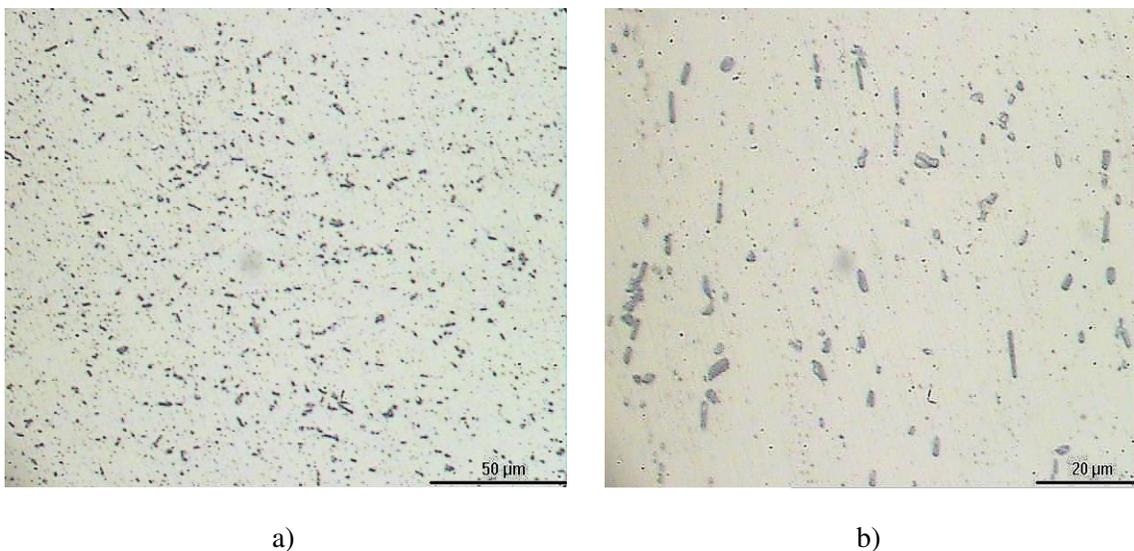
En la tabla siguiente se muestra el área porcentual de las fases de la microestructura precipitados y matriz de aluminio en la probeta en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4).

**Tabla 4.18** Valores del área porcentual de las fases de la probeta en condición de (T4).

	<b>%Precipitados(Mg<sub>2</sub>Si)</b>	<b>%Matriz de aluminio</b>
<b>Condición (T4)</b>	7,77	92,23

#### 4.7.4 Macroscopía a las muestras en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6)

En la siguiente figura 4.25 se observa la microestructura con aumento de 20X y 40X en la probeta de torsión en condición de tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6) sometida a torsión, en la cual se puede apreciar microscópicamente la matriz de aluminio y los precipitados presentes.



**Figura 4.25** Microscopía a la probeta de torsión en condición de T6, a) 20X y b) 40X.

A continuación se presenta en la tabla 4.19 el área porcentual de las fases de la microestructura matriz de aluminio y los precipitados en la probeta en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6).

**Tabla 4.19** Valores del área porcentual de las fases de la probeta en condición (T6).

	<b>%Precipitados(Mg<sub>2</sub>Si)</b>	<b>%Matriz de aluminio</b>
<b>Condición (T6)</b>	14,95	85,05

#### 4.8 Medición de microdureza de las fases presentes en la aleación AA6063

La medición de microdureza Vickers (HV) se realizó en una probeta por cada condición de tratamiento térmico observadas, primordialmente se desea evaluar la variación de dureza existente entre la matriz aluminio y los precipitados en cada condición de tratamiento térmico. La carga aplicada para cada prueba de las muestras fue 0,01 Kg. Los resultados obtenidos se presentan en las tablas 4.20 y 4.21.

**Tabla 4.20** Resumen de los valores de microdureza obtenidos de los precipitados en cada condición de tratamiento térmico.

		<b>T6</b>	<b>T5</b>	<b>T4</b>	<b>O</b>
<b>PRECIPITADOS</b>	<b>M1</b>	68,10	66,48	52,74	44,99
	<b>M2</b>	68,10	66,88	51,09	47,53
	<b>Promedio</b>	68,10	66,68	51,89	46,26

**Tabla 4.21** Resumen de los valores de microdureza obtenidos de la matriz aluminio en cada condición de tratamiento térmico.

		<b>T6</b>	<b>T5</b>	<b>T4</b>	<b>O</b>
<b>MATRIZ DE ALUMINIO</b>	<b>M1</b>	59,18	57,86	42,24	37,28
	<b>M2</b>	58,52	58,52	41,25	36,95
	<b>Promedio</b>	58,85	58,19	41,74	37,11

# CAPÍTULO 5

## *Análisis de Resultados*

---

---

### **5.1 Resultados de la composición química de la aleación de aluminio AA6063**

La composición química de la aleación AA6063 con la cual se desarrolló la investigación se presentó en la tabla 4.1, en dicha tabla se muestra el porcentaje de cada uno de los elementos que componen la aleación en estudio, es pertinente comparar cada uno de los elementos principales de dicha aleación con los límites máximos y mínimos recomendados por la norma ASTM B221 – 05, para de esta manera verificar que todos los valores están dentro de lo recomendado.

A continuación se presenta la tabla con los valores recomendados por la norma ASTM:

**Tabla 5.1** Composición química de la Aleación AA6063 según la norma ASTM.

<i>Aleación</i>	<i>Silicio</i>	<i>Hierro</i>	<i>Cobre</i>	<i>Magnesio</i>	<i>Manganeso</i>	<i>Cromo</i>	<i>Zinc</i>	<i>Titanio</i>
<i>AA6063</i>	<i>0.2-0.6</i>	<i>0.35</i>	<i>0.10</i>	<i>0.45-0.90</i>	<i>0.10</i>	<i>0.10</i>	<i>0.10</i>	<i>0.10</i>

Fuente: Norma ASTM “B221-05 Standard Specification for aluminum alloy for extrusion”

El porcentaje de Silicio (Si) real de la aleación según la tabla mostrada en el capítulo 4, es 0,44%, valor que se encuentra dentro de los límites recomendados por la norma, el Magnesio (Mg) tiene un valor de 0,55%, el cual también está dentro de lo recomendado, otro elemento importante en la aleación como lo es el Hierro (Fe) se encuentra un poco por debajo del límite máximo recomendado por la norma, ya que el valor real es de 0,24% y el valor típico recomendado es 0,35%, los otros elementos presentes en la aleación pero en menor proporción se encuentran muy cercanos a los valores recomendados, por lo que la aleación en estudio es efectivamente una aleación AA6063.

## 5.2 Ensayo de tracción

En la figura 5.1 se muestra la curva esfuerzo vs deformación para una probeta con un comportamiento típico en cada condición de tratamiento térmico, y a continuación se analizan los resultados obtenidos para cada condición de tratamiento térmico.

El objetivo de evaluar la condición inicial del material es tener una referencia del comportamiento mecánico de la aleación en las condiciones de entrega del mismo (T5), y así realizar la comparación pertinente con el comportamiento de la aleación de aluminio 6063 con los tres tratamientos térmicos aplicados (O, T4 y T6), y así observar de manera clara los cambios que se presentan en las propiedades mecánicas con respecto a las iniciales de entrega.

**Tabla 5.2** Comparación de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción para condición de entrega.

<b>Propiedad</b>	<b>Valor experimental (Promedio)</b>	<b>Valor típico Aluminum Association (AA)</b>	<b>Valor típico norma ASTM B221M</b>
<b>Esfuerzo de fluencia, (Sy) (MPa)</b>	128,77	144	Mín. 110
<b>Esfuerzo último, (Su) (MPa)</b>	157,71	186	Mín. 150
<b>% Alargamiento a la ruptura</b>	22,33	-	Mín. 8

El valor promedio del esfuerzo de fluencia es de 128,77 MPa, valor que es menor al valor típico referido por la Aluminum Association en 16,019 MPa, lo que representa un 11,82% de diferencia, aun así este valor es válido ya que la norma ASTM B221M indica que para la condición de T5 el esfuerzo de fluencia debe tener un valor mínimo de 110 MPa, al comparar el valor obtenido con el valor indicado por la norma se observa que el valor experimental es mayor al mínimo recomendado.

El esfuerzo último obtenido de manera experimental arrojó un valor de 157,71 MPa valor que es aceptable ya que se encuentra por encima del mínimo recomendado por la norma ASTM B221M para esta condición de T5, con respecto al valor típico de la AA existe una diferencia de 17,93%.

Por último a partir de este ensayo se evaluó la ductilidad del material mediante el porcentaje de alargamiento a la ruptura, obteniéndose un valor experimental de 22,33%, el cual es mayor al mínimo permitido por la norma correspondiente.

En cuanto a la condición de recocido (O), al observar las curvas esfuerzo vs deformación de la figura 4.2 se observa que para esta condición de tratamiento térmico los valores de deformación son mayores y los de esfuerzos son menores con respecto a las otras condiciones de tratamiento térmico aquí estudiadas. El objetivo de estudiar esta condición de tratamiento térmico es lograr una relación entre las propiedades obtenidas aquí con respecto a las obtenidas en condición de entrega (T5), T4 y T6.

**Tabla 5.3** Comparación de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción para la condición de recocido (O).

Propiedad	Valor experimental (Promedio)	Valor típico Aluminum Association (AA)	Valor típico norma ASTM B221M
Esfuerzo de fluencia (Sy) (MPa)	57,65	49	-
Esfuerzo último (Su) (MPa)	87,17	90	Máx 130
% Alargamiento a la ruptura	36,21	-	Min 18

El esfuerzo de fluencia obtenido experimentalmente es de 57,65 MPa, valor que es mayor que el valor típico referido por la AA en 8,65 MPa, lo que representa un

17,65% de diferencia. La norma ASTM B221M no establece un mínimo para esta propiedad. En cuanto al esfuerzo último recomendado por la AA y el valor obtenido experimentalmente existe una diferencia de 3,24%, y además el valor obtenido se encuentra por debajo del máximo recomendado por la norma ASTM B221M.

Por último en cuanto a la ductilidad del material, se observa que el valor que se obtuvo para el porcentaje de alargamiento a la ruptura de manera experimental es mayor al mínimo recomendado por la norma ASTM B221M.

Para la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4), se observa en los resultados obtenidos un aumento considerable del esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último con respecto a la condición de recocido, así como una disminución en la ductilidad del mismo.

**Tabla 5.4** Comparación de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción para la condición de T4.

<b>Propiedad</b>	<b>Valor experimental (Promedio)</b>	<b>Valor típico Aluminum Association (AA)</b>	<b>Valor típico norma ASTM B221M</b>
<b>Esfuerzo de fluencia (Sy) (MPa)</b>	83,62	89	Mín. 70
<b>Esfuerzo último (Su) (MPa)</b>	165,83	172	Mín. 130
<b>% Alargamiento a la ruptura</b>	30,155	-	Mín. 14

El esfuerzo de fluencia obtenido experimentalmente es mayor al mínimo recomendado por la norma ASTM B221M, y además se encuentra muy cercano al valor típico de la AA, ya que la diferencia entre uno y otro es de 6,4%.

El esfuerzo último se encuentra muy próximo al valor típico según la AA, siendo la diferencia entre uno y otro de 3,72%, además el valor obtenido es mayor al mínimo referenciado por la ASTM que es 130 MPa.

La ductilidad del material para esta condición, representada en términos del porcentaje de alargamiento a la rotura, arrojó un valor experimental de 30,155%, valor

que es mayor al mínimo recomendado por la ASTM B221M, razón por la cual este valor es aceptable.

Por último para la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6), los resultados obtenidos muestran una disminución considerable con respecto a la ductilidad del material, así como un aumento evidente en los esfuerzos de fluencia y último respectivamente. A continuación se muestra el cuadro comparativo de dichos resultados con los típicos de la AA y los límites de la norma ASTM B221M.

**Tabla 5.5** Comparación de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción para la condición de T6.

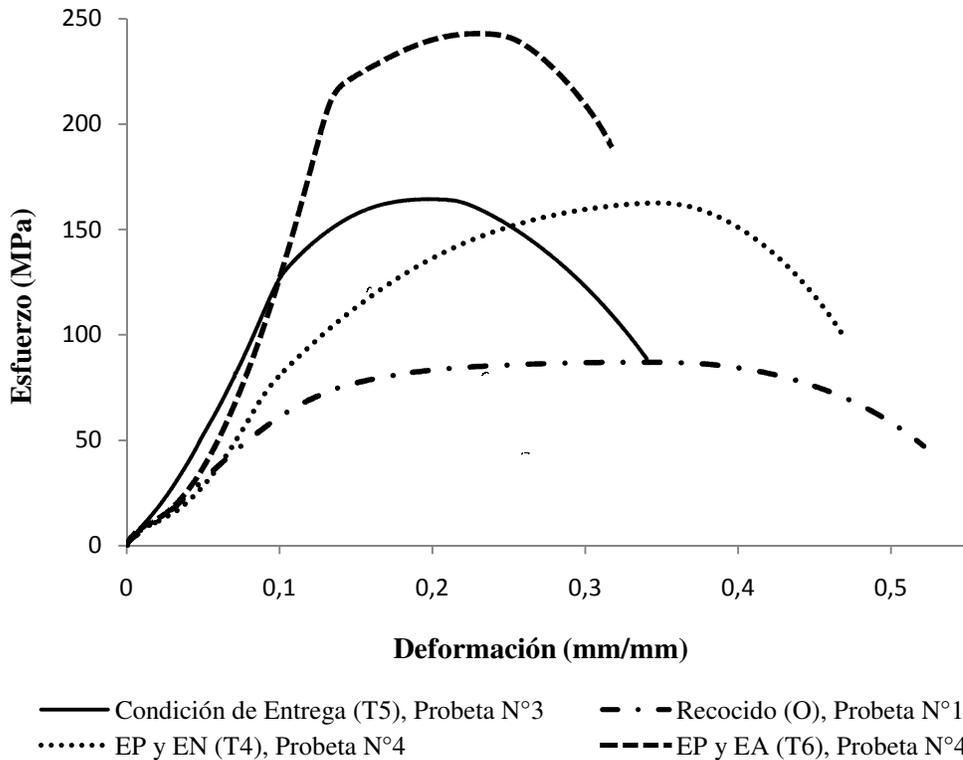
<b>Propiedad</b>	<b>Valor experimental (Promedio)</b>	<b>Valor típico Aluminum Association (AA)</b>	<b>Valor típico norma ASTM B221M</b>
<b>Esfuerzo de fluencia (Sy) (MPa)</b>	217,52	213	Mín. 170
<b>Esfuerzo último (Su) (MPa)</b>	240,77	241	Mín. 205
<b>% Alargamiento a la ruptura</b>	21,57	-	Mín. 8

El esfuerzo de fluencia obtenido experimentalmente es mayor al mínimo recomendado por la norma ASTM B221M que en este caso es de 170 MPa, y además se encuentra muy próximo al valor típico de la AA, ya que la diferencia entre uno y otro es de 4,52 MPa lo que representa un 2,12% de diferencia.

En cuanto al esfuerzo último se encuentra aún más cercano al valor típico según la AA, siendo la diferencia entre uno y otro de 0,09%, además el valor obtenido es mayor al mínimo recomendado por la ASTM que es 205 MPa.

La ductilidad del material para esta condición, arrojó un valor experimental de 21,57%, valor que es mayor al mínimo recomendado por la ASTM B221M que es de 8%. A continuación se muestra una gráfica que evidencia la influencia en las propiedades mecánicas de cada uno de los tratamientos térmicos aplicados a la

aleación, mediante la representación de una curva típica de esfuerzo vs deformación para cada condición de tratamiento térmico.

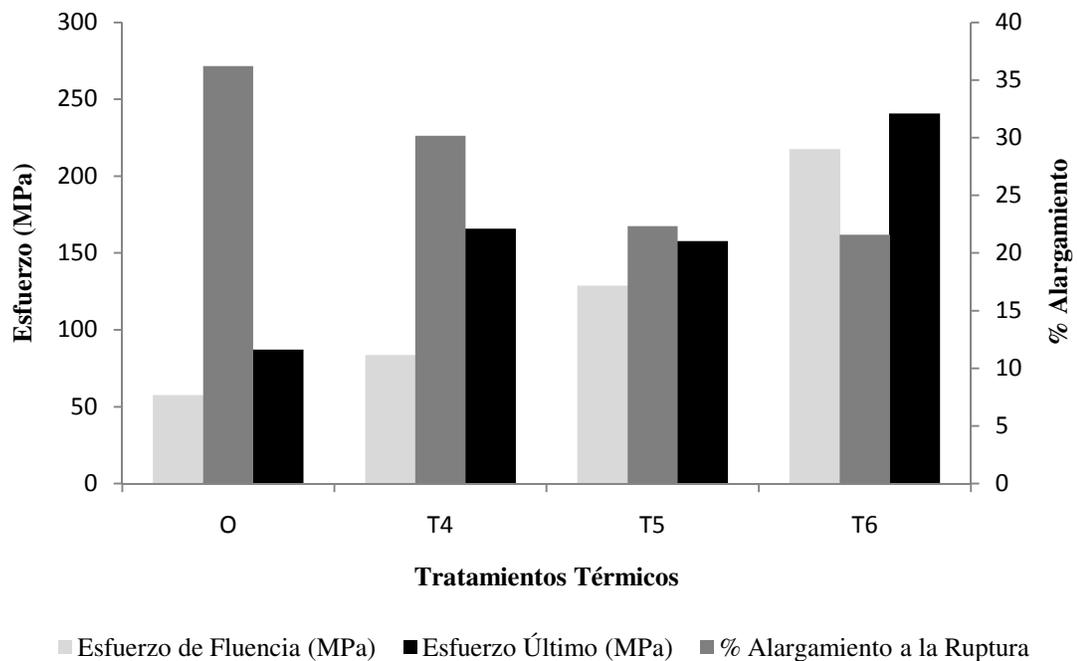


**Figura 5.1** Gráfica de esfuerzo vs deformación típicas para cada condición de tratamiento térmico.

A partir de la gráfica 5.1 y con los resultados anteriormente tabulados para cada condición se puede decir que el esfuerzo de fluencia en condiciones de T4 es 1,5 veces mayor al esfuerzo de fluencia en recocido (O), en T5 es un poco más del doble y en T6 es un poco más de 3,5 veces mayor.

De manera análoga ocurre con el comportamiento del esfuerzo último que en condiciones de T4 es 1,90 veces mayor al esfuerzo último en condiciones de recocido (O), en T5 es 1,80 veces mayor y en T6 es 2,8 veces mayor al esfuerzo último en condiciones de recocido.

Con respecto a la ductilidad del material claramente se observa que la condición de recocido es la que permite la mayor deformación, así como la que menos deformación presenta es la de T6; mientras las condiciones de T4 y T5 ofrecen un comportamiento intermedio, siendo un poco más dúctil la aleación en condición de T4.



**Figura 5.2** Comportamiento de las propiedades mecánicas y la ductilidad del material de acuerdo al tratamiento térmico aplicado.

En la figura 5.2 se observa cómo se comportan el esfuerzo de fluencia, la resistencia última a la tracción y la ductilidad del material con respecto a la aplicación de los tratamientos térmicos, en la misma se observa que la ductilidad del material es mayor para la condición de recocido siendo para esta condición donde las propiedades mecánicas son menores, así como mejor comportamiento en cuanto a propiedades mecánicas se tiene para el tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6) esto a expensas de una disminución de la ductilidad del material, las condiciones de T4 y T5 tienen un comportamiento similar en cuanto a

propiedades mecánicas a diferencia de la ductilidad que es mayor para la condición de T4.

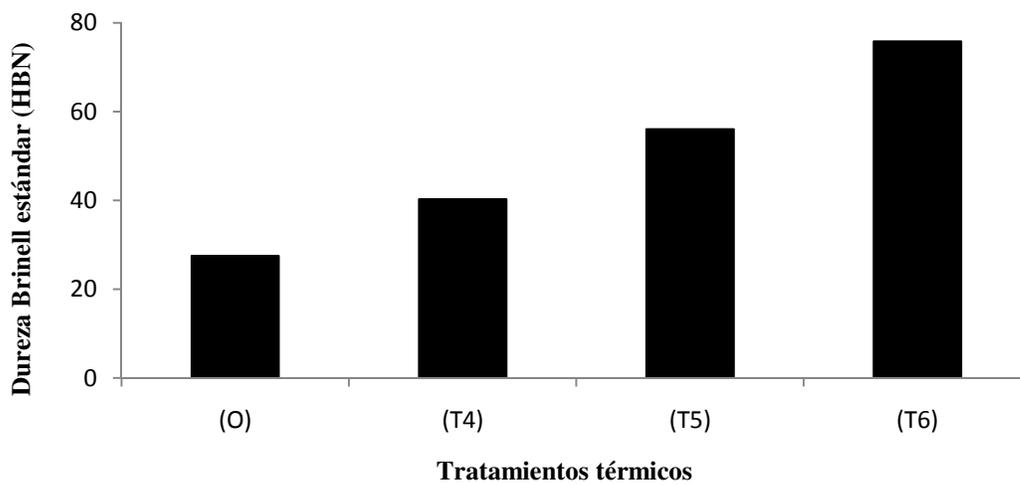
### 5.3 Ensayos de dureza

Los ensayos se realizaron en escala de dureza Brinell estándar, y en escala de dureza superficial Rockwell 15 – T, los cuales fueron convertidos a dureza Brinell estándar, empleando la norma correspondiente, el objetivo de llevar todos los valores a esta escala de dureza radica en que los valores referidos por las normas se encuentran en dicha escala. A continuación se presenta una tabla que resume los valores obtenidos durante los ensayos para cada condición y el valor referido por la norma:

**Tabla 5.6** Resumen de resultados de dureza Brinell estándar aleación de aluminio AA6063.

	(T5)	(O)	(T4)	(T6)
Dureza Brinell estándar (HBN)	56,1	27,53	40,33	75,89
Valor típico Alluminium Association (AA)	60	25	46	73

A continuación se presenta una gráfica que muestra la influencia que ejercen los tratamientos térmicos aplicados en la aleación de aluminio AA6063:



**Figura 5.3** Comportamiento de la dureza de acuerdo al tratamiento térmico aplicado.

En la figura anterior se observa que la dureza más baja se tiene para la condición de recocido (O), si se compara este valor con la dureza del tratamiento térmico T4 se observa que la dureza aumenta en un 30% aproximadamente, con respecto a la condición de entrega del material la dureza se duplica, y con respecto al envejecimiento artificial T6 casi lo triplica, verificándose así el objetivo de los tratamientos térmicos de endurecimiento por precipitación y envejecimiento de esta aleación de aluminio el cual es aumentar los valores de las propiedades de la aleación.

El comportamiento de la dureza de todas las condiciones ensayadas tiende a ser constante a lo largo de la línea donde se realizaron las indentaciones que va de extremo a extremo de la probeta pasando por el centro de la misma, siendo la desviación estándar mayor, un valor de 2,5 HBN la cual fue registrada en la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4).

Con respecto a los valores reportados por la AA, la condición de entrega presenta un error de 6,5 %, lo que representa 3,9 HBN, en cuanto a la condición de recocido la misma presenta una diferencia de 2,53 HBN, la condición de T4 presentó un valor de 40,33 HBN, siendo el valor típico reportado 46 HBN, por último la condición de T6 presenta un error de 3,65 %, siendo todos estos valores muy aceptables debido a que se encuentran bastante cercanos a los valores referenciales reportados.

#### **5.4 Ensayos de torsión**

Por medio de los resultados obtenidos en los ensayos de torsión se conocieron los valores que describen el comportamiento mecánico a torsión de la aleación de aluminio AA6063 tanto en su condición de entrega (T5), como para los tratamientos térmicos aplicados (O, T4 y T6).

A continuación se observa el promedio de los valores característicos obtenidos de manera experimental a torsión de la aleación de aluminio AA6063 en condición de entrega (T5), así como también la desviación estándar de dichos valores.

**Tabla 5.7** Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en condición de entrega (T5).

	<b>Módulo de corte, G (GPa)</b>	<b>Esfuerzo de fluencia, <math>\tau_y</math> (MPa)</b>	<b>Esfuerzo último, <math>\tau_{m\acute{a}x}</math> (MPa)</b>	<b>Deformación angular a la rotura, <math>\gamma_{m\acute{a}x}</math> (rad/rad)</b>
<b>Promedio</b>	16,48	96,23	154,73	2,908
<b>Desviación</b>	1,65	4,50	5,88	0,096

Como se observa en la gráfica de esfuerzo de corte Vs deformación angular de la figura 4.9 las curvas para las siete probetas ensayadas en condición de entrega (T5) presentan el mismo comportamiento, los valores obtenidos son muy cercanos para cada probeta, razón por la cual las desviaciones entre ellos son relativamente bajas.

El esfuerzo de fluencia al corte obtenido es igual a 96,23 MPa, la dispersión entre los valores obtenidos es de 4,50 MPa, el esfuerzo último al corte arrojó un valor promedio de 154,73 MPa con una desviación estándar de 5,88 MPa, con una deformación angular a la rotura de 2,908 rad/rad, lo que equivale aproximadamente a 3300 grados de giro, es decir la fractura del material ocurrió en promedio a las 9 vueltas aproximadamente. El incremento que ocurre entre el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último se debe al endurecimiento por deformación que admite la aleación para esta condición luego que pasa por la zona elástica. Por último el módulo de corte obtenido presenta un valor de 16,48 GPa con una desviación de 1,65 GPa, como se mencionó en el capítulo anterior la obtención de este valor no es del todo correcta ya que no se cuenta con el equipo adecuado para ello.

En la siguiente tabla se muestra la comparación entre los valores experimentales obtenidos y los valores referenciales.

**Tabla 5.8** Comparación de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en condición de entrega (T5).

	<b>Valor experimental (Promedio)</b>	<b>Valor referencial</b>
<b>Esfuerzo de fluencia, <math>\tau_y</math> (MPa)</b>	96,23	117 <sup>A</sup>
<b>Módulo de corte, G (GPa)</b>	16,48	25,8 <sup>B</sup>

**A:** Aluminum Association (AA).

**B:** ASM Metals Handbook, Volumen 2.

En cuanto a la comparación de los resultados obtenidos con los recomendados por la AA y el ASM Metals Handbook, que en este caso solo reporta valores para el esfuerzo de fluencia al corte registrado por la AA y el módulo de corte registrado por el ASM Metals Handbook, el esfuerzo de fluencia registrado es 117 MPa mientras que el valor obtenido experimentalmente es de 96,23 MPa, lo que indica que el resultado está por debajo un 20% aproximadamente. Por otra parte el módulo de corte especificado es de 25,8 GPa y el obtenido experimentalmente presenta un valor de 16,48 GPa, lo que indica que el valor estuvo por debajo en un 36%.

La tabla 5.9 muestra el promedio de los valores característicos obtenidos a torsión de la aleación AA6063 en condición de recocido (O), así como también la desviación estándar de dichos valores.

**Tabla 5.9** Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en condición de recocido (O).

	Módulo de corte, G (GPa)	Esfuerzo de fluencia, $\tau_y$ (MPa)	Esfuerzo último, $\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Deformación angular a la rotura, $\gamma_{m\acute{a}x}$ (rad/rad)
<b>Promedio</b>	4,00	28,48	113,68	4,486
<b>Desviación</b>	1,97	3,20	2,88	0,456

Como se observa en la gráfica de esfuerzo de corte Vs deformación angular de la figura 4.11 las curvas para las siete probetas ensayadas en condición de recocido (O) presentan el mismo comportamiento, los valores obtenidos son muy cercanos, razón por la cual las desviaciones entre ellos son relativamente bajas.

El esfuerzo de fluencia al corte obtenido es igual 28,48 MPa, la dispersión entre los valores obtenidos es de 3,20 MPa, el esfuerzo último al corte arrojó un valor promedio de 113,68 MPa con una desviación estándar de 2,88 MPa, con una deformación angular a la rotura de 4,486 rad/rad, lo que equivale aproximadamente a 5141 grados de giro, es decir la fractura del material ocurrió en promedio a las 14 vueltas aproximadamente. El incremento notablemente grande que ocurre entre el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último se debe al endurecimiento por deformación

considerable que admite la aleación estando en esta condición luego que pasa por la zona elástica. Finalmente el módulo de corte obtenido presenta un valor de 4,00 GPa con una desviación de 1,97 GPa.

En la siguiente tabla se muestra la comparación entre los valores experimentales obtenidos y los valores referenciales.

**Tabla 5.10** Comparación de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en condición de recocido (O).

	Valor experimental (Promedio)	Valor referencial
Esfuerzo de fluencia, $\tau_y$ (MPa)	28,48	69 <sup>A</sup>
Módulo de corte, G (GPa)	4,00	25,8 <sup>B</sup>

A: Aluminum Association (AA).

B: ASM Metals Handbook, Volumen 2.

En cuanto a la comparación de los resultados obtenidos con los recomendados por la AA y el ASM Metals Handbook, el esfuerzo de fluencia registrado es 69 MPa mientras que el valor obtenido experimentalmente es de 28,48 MPa, lo que indica que el resultado equivale a un 42% del valor referencial. Por otra parte el módulo de corte especificado es de 25,8 GPa y el obtenido experimentalmente presenta un valor de 4,00 GPa, lo que indica que el valor representa un 15% del valor referencial. Cabe destacar que el valor referencial no especifica la condición en la que se encuentra el material, razón por la cual existe gran diferencia entre el valor experimental y dicho valor.

A continuación se observa el promedio de los valores característicos obtenidos a torsión de la aleación AA6063 en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4), así como también la desviación estándar de dichos valores.

**Tabla 5.11** Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4).

	Módulo de corte, G (GPa)	Esfuerzo de fluencia, $\tau_y$ (MPa)	Esfuerzo último, $\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Deformación angular a la rotura, $\gamma_{m\acute{a}x}$ (rad/rad)
<b>Promedio</b>	9,96	65,74	170,78	3,447
<b>Desviación</b>	1,70	4,53	9,15	0,437

Como se observa en la gráfica de esfuerzo de corte Vs deformación angular de la figura 4.13 las curvas para las siete probetas ensayadas en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4) presentan el mismo comportamiento, los valores obtenidos son muy cercanos, razón por la cual las desviaciones entre ellos son relativamente bajas.

El esfuerzo de fluencia al corte obtenido es igual 65,74 MPa, la dispersión entre los valores obtenidos es de 4,53 MPa, el esfuerzo último al corte arrojó un valor promedio de 170,78 MPa con una desviación estándar de 9,15 MPa, con una deformación angular a la rotura de 3,447 rad/rad, lo que equivale aproximadamente a 3945 grados de giro, es decir la fractura del material ocurrió en promedio a las 11 vueltas aproximadamente. El incremento notable que ocurre entre el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último se debe al endurecimiento por deformación considerable que admite la aleación estando en esta condición luego que pasa por la zona elástica. Finalmente el módulo de corte obtenido presenta un valor de 9,96 GPa con una desviación de 1,70 GPa.

En la siguiente tabla se muestra la comparación entre los valores experimentales obtenidos y los valores referenciales.

**Tabla 5.12** Comparación de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4).

	Valor experimental (Promedio)	Valor referencial
<b>Esfuerzo de fluencia, <math>\tau_y</math> (MPa)</b>	65,74	110 <sup>A</sup>
<b>Módulo de corte, G (GPa)</b>	9,96	25,8 <sup>B</sup>

**A:** Aluminum Association (AA).

**B:** ASM Metals Handbook, Volumen 2.

En cuanto a la comparación de los resultados obtenidos con los recomendados por la AA y el ASM Metals Handbook, el esfuerzo de fluencia registrado es 110 MPa mientras que el valor obtenido experimentalmente es de 65,74 MPa, lo que indica que el resultado equivale a un aproximadamente a un 60% del valor referencial. Por otra parte el módulo de corte especificado es de 25,8 GPa y el obtenido experimentalmente presenta un valor de 9,96 GPa, lo que indica que el valor representa un 40% del valor referencial. Cabe destacar que el valor referencial no especifica la condición en la que se encuentra el material, razón por la cual existe una diferencia notable entre el valor experimental y dicho valor.

En la tabla 5.13 se observa el promedio de los valores característicos obtenidos a torsión de la aleación AA6063 en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6), así como también la desviación estándar de dichos valores.

**Tabla 5.13** Promedio de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6).

	Módulo de corte, G (GPa)	Esfuerzo de fluencia, $\tau_y$ (MPa)	Esfuerzo último, $\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	Deformación angular a la rotura, $\gamma_{\text{máx}}$ (rad/rad)
<b>Promedio</b>	18,18	208,27	233,37	3,451
<b>Desviación</b>	1,28	9,63	4,57	0,832

Como se observa en la gráfica de esfuerzo de corte Vs deformación angular de la figura 4.15 las curvas para las siete probetas ensayadas en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6) presentan el mismo comportamiento, los valores obtenidos son muy cercanos, razón por la cual las desviaciones entre ellos son relativamente bajas. En esta condición se observa que las curvas presentan un comportamiento plano en la zona plástica, esto se debe a que en dicha condición de tratamiento térmico el material el endurecimiento por deformación tiende a cero, ya que al aplicar este tratamiento térmico el material alcanza niveles de dureza elevados.

El esfuerzo de fluencia al corte obtenido es igual 208,27 MPa, la dispersión entre los valores obtenidos es de 9,63 MPa, el esfuerzo último al corte arrojó un valor promedio de 233,37 MPa con una desviación estándar de 4,57 MPa, con una deformación angular a la rotura de 3,451 rad/rad, lo que equivale aproximadamente a 3877 grados de giro, es decir la fractura del material ocurrió en promedio a las 10,5 vueltas aproximadamente. El poco incremento que ocurre entre el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último se debe a que existe poco endurecimiento por deformación que admite la aleación estando en esta condición luego que pasa por la zona elástica. Finalmente el módulo de corte obtenido presenta un valor de 18,18 GPa con una desviación de 1,28 GPa.

En la siguiente tabla se muestra la comparación entre los valores experimentales obtenidos y los valores referenciales.

**Tabla 5.14** Comparación de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión en condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6).

	Valor experimental (Promedio)	Valor referencial
Esfuerzo de fluencia, $\tau_y$ (MPa)	208,27	152 <sup>A</sup>
Módulo de corte, G (GPa)	18,18	25,8 <sup>B</sup>

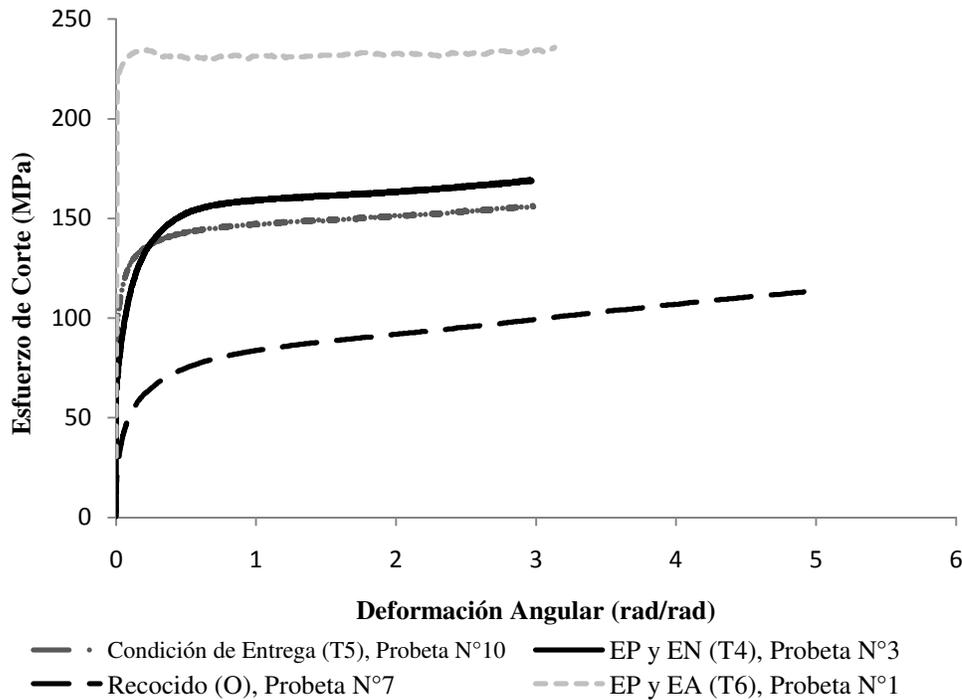
**A:** Aluminum Association (AA).

**B:** ASM Metals Handbook, Volumen 2.

En cuanto a la comparación de los resultados obtenidos con los recomendados por la AA y el ASM Metals Handbook, el esfuerzo de fluencia registrado es 152 MPa mientras que el valor obtenido experimentalmente es de 208,27 MPa, lo que indica que el resultado es superior al valor referencial en un 27%. Por otra parte el módulo de corte especificado es de 25,8 GPa y el obtenido experimentalmente presenta un valor de 18,18 GPa, lo que indica que el valor representa un 70% del valor referencial.

En la figura 5.4 se presenta el comportamiento típico de las curvas de esfuerzo de corte vs deformación angular para cada condición de tratamiento térmico y la condición de entrega, esto con el fin de observar la diferencia entre el comportamiento

mecánico a torsión característico de este material para cada condición, en dicho grafico se puede observar cómo influye cada tratamiento térmico tanto en las propiedades como en la deformación última.



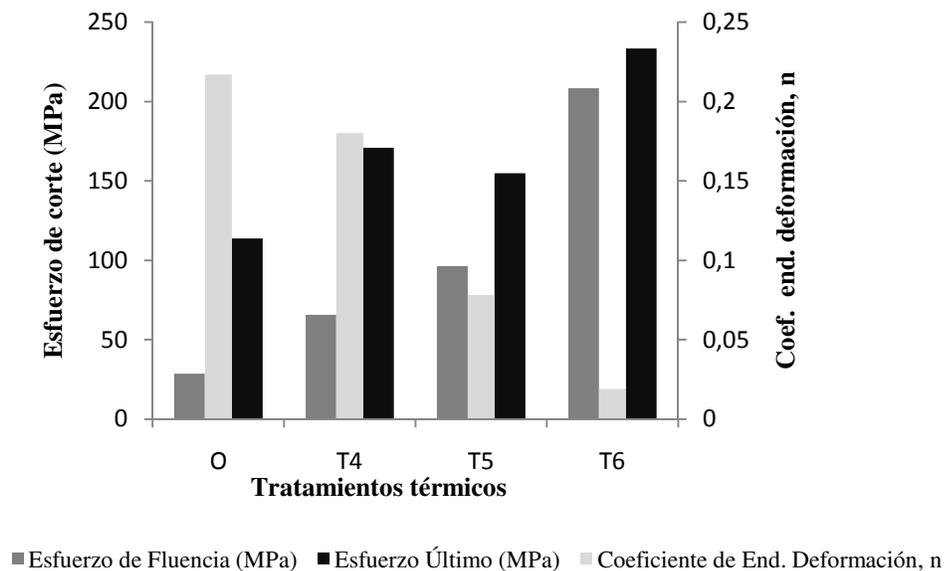
**Figura 5.4** Gráfica de esfuerzo de corte vs deformación angular típicas para cada condición de tratamiento térmico.

A continuación se presenta una tabla comparativa de los parámetros característicos a torsión para cada condición de tratamiento térmico y la condición de entrega (T5).

**Tabla 5.15** Comparación de las propiedades obtenidas del ensayo de torsión para cada condición de tratamiento térmico.

Condición	Módulo de corte, G (GPa)	Esfuerzo de fluencia, $\tau_y$ (MPa)	Esfuerzo último, $\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Deformación angular a la rotura, $\gamma_{m\acute{a}x}$ (rad/rad)	Coef. de end. por deformación, n
T5	16,48	96,23	154,73	2,908	0,078
O	4,00	28,48	113,68	4,486	0,217
T4	9,96	65,74	170,78	3,447	0,180
T6	18,18	208,27	233,37	3,457	0,019

En la siguiente figura se muestra claramente el comportamiento de las propiedades mecánicas a corte de la aleación AA6063 para su condición de entrega (T5), y para los tres tratamientos térmicos aplicados (O, T4 y T6). En dicha gráfica se observa como los esfuerzos de fluencia y último se incrementan, siendo el tratamiento térmico que brinda mejores propiedades mecánicas el T6 y las más deficientes el recocido (O). Por otra parte en esta gráfica también se observa como el coeficiente de endurecimiento por deformación es alto para la condición de recocido y muy bajo tendiendo a cero para la condición de T6, mientras que para T4 y T5 se observa un comportamiento intermedio.



**Figura 5.5** Comportamiento de las propiedades mecánicas y el coeficiente de endurecimiento por deformación para cada condición de la aleación.

### 5.5 Relaciones entre las propiedades obtenidas de los ensayos de tracción y torsión

Al aplicar las relaciones entre el esfuerzo de fluencia obtenido en el ensayo de tracción y el esfuerzo de fluencia obtenido a torsión, se observa como esta relación disminuye con la aplicación de los tratamientos térmicos de endurecimiento, esto se puede observar en la tabla 4.15, ya que para la condición de recocido se tiene la

relación más alta y para la condición de T6 la más baja. Al comparar estos resultados con los criterios de fluencia de Tresca y Von Mises, se determinan los errores entre cada criterio y para cada condición del material, estos errores se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 5.16** Errores de las relaciones entre el esfuerzo de fluencia a tracción y a torsión de la aleación de aluminio AA6063 respecto a los criterios de fluencia.

	<b>O</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>
<b>Error</b> TRESCA (%)	1,00	36,50	33,50	48,00
<b>Error</b> VON MISES (%)	14,35	26,58	23,08	39,88

En la tabla anterior se observa que en general la condición de recocido es la que más se acerca a ambos criterios obteniéndose errores de 1% y 14,35% para Tresca y Von Mises respectivamente.

Para las otras condiciones en las que se evaluó la aleación, es decir, condición de entrega (T5), T4 y T6 el criterio de Von Mises arrojó resultados más cercanos que los de Tresca, teniéndose errores de 23,08% para la condición de entrega, 26,58% para T4, y 40% para T6, siendo los errores por Tresca mucho mayores a estos.

De acuerdo con lo descrito anteriormente se puede establecer que el criterio de Von Mises describe mejor los resultados obtenidos para las condiciones en las cuales se sometió a este material (AA6063) a tratamientos térmicos de endurecimiento, ya que las relaciones experimentales están más cercanas a las que este criterio indica como comunes para materiales dúctiles. A diferencia de la condición de recocido para la cual el criterio que más se ajusta es el de Tresca, ya que su relación con respecto a la relación experimental es mucho más cercana que la relación de Von Mises.

## 5.6 Evaluación macroscópica de la aleación de aluminio AA6063

A continuación se presenta el análisis de la evaluación macroscópica de la aleación en estudio en condición de entrega (T5), así como en los tres tratamientos

termicos aplicados, recocido (O), endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4) y artificial (T6).

Para la condición de entrega (T5), en la figura 4.17 se puede observar una sección longitudinal de la muestra torsionada que fue preparada y posteriormente atacada con el reactivo Tucker's recomendado por la norma correspondiente a análisis macroscópicos (ASTM E3-04, 2004), en ella se observa de manera poco definida la línea central de la superficie, también se aprecia la orientación alargada de las fibras con un cierto ángulo de inclinación producto de la deformación sufrida. Por último, en este análisis macroscópico de la aleación en esta condición, se observa que las fibras tienden a ser más grandes hacia la línea central y más pequeñas hacia los bordes de la muestra, esto se debe a que en los ensayos de torsión la deformación es proporcional al radio de giro de la probeta.

Para la condición de recocido (O), se observa claramente en la figura 4.18 la línea central generada por la torsión, así como también se observa la orientación inclinada y alargada de las fibras. Cabe destacar que en esta condición se aprecia que existen fibras más grandes alrededor de la línea central, pero que en comparación con la condición de entrega del material existen en menor proporción, esto se debe a que para la condición de recocido el material obtuvo la mayor deformación plástica, por lo cual las fibras pequeñas se observan en gran cantidad.

En la figura 4.19 para la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4), se observa de manera poco definida dos tonalidades, una oscura hacia los bordes de la sección y otra clara hacia el centro de la misma, apreciándose de manera poco definida la línea central de la probeta, por otra parte también se observan al igual que en las condiciones anteriores, la presencia de fibras orientadas con un cierto ángulo de inclinación así como de mayor tamaño hacia la línea central y muy pequeñas hacia los bordes.

Por último para la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6), se observa claramente la línea central de la probeta en la figura 4.20, además se aprecian las fibras más grandes hacia el centro y las más pequeñas hacia los bordes, cabe destacar que para esta condición las fibras de mayor tamaño se ven en una proporción más pequeña que para las condiciones de T4 y de T5, esto se debe a que la condición de T6 se deformó un poco más que las anteriores.

### **5.7 Evaluación microscópica de la aleación de aluminio AA6063**

A continuación se presenta el análisis de la evaluación microscópica de la aleación en estudio en condición de entrega (T5), así como en los tres tratamientos térmicos aplicados, recocido (O), endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4) y artificial (T6).

En cuanto al análisis microscópico realizado a las muestras en condición de entrega (T5), en la figura 4.21, se observa claramente la presencia de los precipitados en la matriz de aluminio, siendo el material estudiado una aleación cuyos componentes principales son aluminio – magnesio – silicio, la microestructura revelada está compuesta en gran proporción por aluminio que son las superficies claras que se observan en la figura 4.21 a) y b), así como las negras representan los siliciuros de magnesio ( $Mg_2Si$ ) presentes en la misma. El porcentaje de precipitados presentes es de 9,97% mientras que el porcentaje restante que corresponde a la matriz de aluminio, en este caso es 90,03%.

Para esta condición se observa una mezcla entre precipitados de gran tamaño y precipitados pequeños presentes en toda la matriz. Estas características que presenta la microestructura de la aleación es la responsable de que sea esta la condición de entrega del material (T5), debido a que presenta un conjunto de propiedades a tracción, torsión y dureza moderadas, ya que los valores obtenidos no son los mayores que se pueden obtener para dicha aleación y mucho menos los menores.

Para la condición de recocido (O), se observan de forma clara las fases presentes en la microestructura, notándose que la cantidad de precipitados con respecto a la condición anterior es mucho menor, esto se debe a que en este estado de tratamiento térmico no se precipitan en gran cantidad los siliciuros de magnesio ( $Mg_2Si$ ), de igual forma se observa que estos se manifiestan con un color negro y la matriz de aluminio en mayor proporción para esta condición, de color blanco. Para esta condición el porcentaje de área de los precipitados arrojó un valor de 4,17% mientras que la matriz de aluminio 95,83%.

Al observar la figura 4.23 es evidente que los precipitados se encuentran bien distribuidos en toda la matriz, sin embargo estos son de menor tamaño con respecto a las otras condiciones de tratamiento térmico debido a lo mencionado anteriormente. Esta característica que presenta la microestructura de la aleación para esta condición de tratamiento térmico tiene una influencia directa en la propiedades a tracción, torsión y dureza de la misma, ya que para dicha condición estos valores fueron los más bajos, lo que trae como consecuencia que esta condición presente la mayor ductilidad con respecto a las demás.

La microestructura para el tratamiento térmico de T4 presenta al igual que en los casos anteriores dos fases predominantes el aluminio y los precipitados, observándose de manera clara la redistribución de estos en la matriz, destacando que en comparación con la microestructura revelada por la condición de entrega, para esta condición la presencia de precipitados es un poco menor. El porcentaje de área de precipitados es de 7,77% siendo lo restante 92,23% de matriz de aluminio.

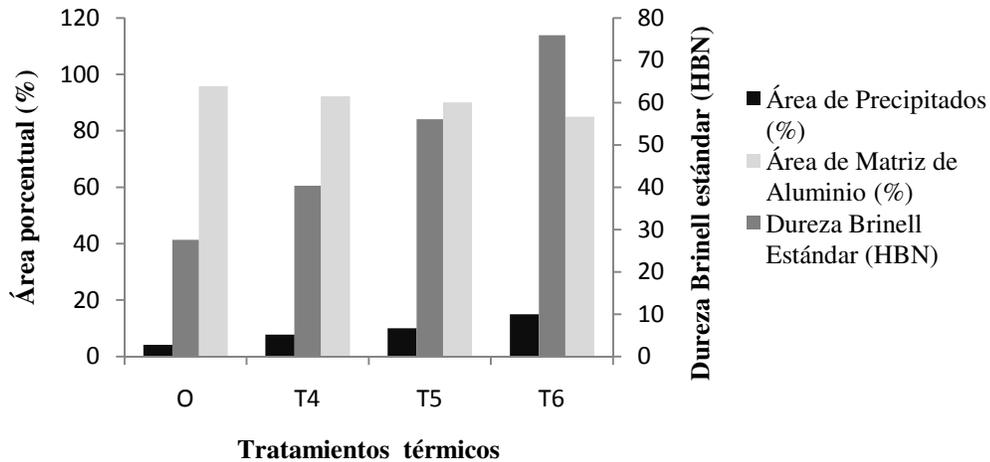
Se observa claramente en la figura 4.24 que si bien la proporción de precipitados con respecto a la condición de entrega (T5) es menor, la presencia de precipitados de mayor tamaño es evidente, con la diferencia de que no se encuentran distribuidos uniformemente en toda la matriz, es por ello que las propiedades a tracción torsión y dureza para esta condición son menores en resistencia que las obtenidas en la condición de entrega (T5).

Para la condición de T6, se observa que la concentración de precipitados se presenta en mayor proporción que las condiciones anteriores, lo que evidencia que al exponer a la aleación a un envejecimiento artificial durante siete (7) horas, se produce de manera más efectiva la combinación del magnesio y el silicio formando así el siliciuro de magnesio ( $Mg_2Si$ ), compuesto que se encarga de mejorar comportamiento de las propiedades mecánicas. El área porcentual de precipitados arrojó un valor de 14,95% mientras que la matriz de aluminio un 85,05%.

Al observar la figura 4.25, es evidente que el porcentaje de precipitados es mayor con respecto a las otras condiciones de tratamiento térmico, así como también es notable la presencia de precipitados de mayor tamaño y a su vez distribuidos uniformemente en toda la matriz, lo cual evita el movimiento de las dislocaciones (Smith, 2003) y a su vez incrementa el endurecimiento de la aleación por precipitación. Esta característica presente en la microestructura de la aleación para esta condición, es la responsable de que las propiedades mecánicas tanto a tracción, torsión y dureza sean las mejores con respecto a los demás tratamientos térmico aplicados.

La influencia de los tratamientos térmicos en la microestructura de la aleación es notable y por consiguiente en las propiedades a tracción, torsión y dureza de la misma, es por ello que resulta importante presentar una gráfica comparativa del área porcentual de precipitados, el área porcentual de la matriz de aluminio y la dureza Brinell estándar del material con respecto a la condición de la aleación, es decir, condición de entrega (T5), recocido (O), endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4) y endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6), la cual se muestra en la figura 5.6.

Se observa la influencia que ejercen los tratamientos térmicos en la microestructura de la aleación, se observa que para todas las condiciones a medida que aumenta el área de precipitados de siliciuro de magnesio en la aleación, esta se endurece, es decir la relación es directamente proporcional, ya es que esta es una de las características principales de esta aleación de la serie 6000 que puede ser endurecible por precipitación mediante los tratamientos térmicos de envejecimiento.



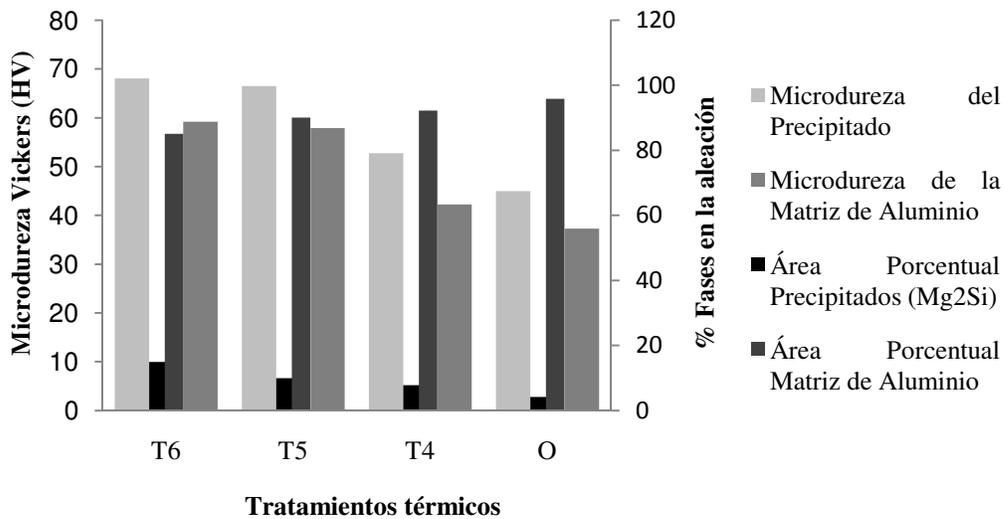
**Figura 5.6** Influencia de los tratamientos térmicos en la microestructura y la dureza del material.

### 5.8 Medición de microdureza de las fases presentes en la aleación AA6063

Al establecer una comparación con los resultados obtenidos de microdureza de los precipitados y la matriz aluminio, se puede observar que se produce un incremento en la dureza de la microestructura, por lo que se demuestra que a medida que se aplican los tratamientos térmicos de la aleación de aluminio, estos generan cambios en las propiedades mecánicas, ya que se incrementa el área porcentual de precipitados en la matriz de tal forma que evitan el movimiento de las dislocaciones en el material (Smith, 2003), lo que genera un incremento de la dureza en la aleación. Cabe destacar que las mediciones de microdureza de los precipitados no son del todo exactas debido a que al momento de realizar la medición se observó que el tamaño de la indentación era mucho mayor que el tamaño del precipitado por lo que el valor de microdureza medido no corresponde completamente al del siliciuro de magnesio ( $Mg_2Si$ ) solamente sino que también abarca la matriz de aluminio. En algunos casos se observó que la indentación fue mucho mayor al tamaño del precipitado de tres a ocho veces.

En la figura 5.7 se observa claramente la influencia que ejercen los tratamientos térmicos en la dureza de la microestructura (matriz aluminio y precipitados) en aleación AA6063, se observa que la dureza más baja se obtiene en la condición de recocido, seguidamente, si se compara con la condición siguiente T4, esta

se incrementa en un 20% aproximadamente, la condición de entrega se incrementa el doble respecto al recocido, y por último para la condición de T6 se observa un aumento del 2% con respecto a la condición de envejecimiento natural, comprobando que la aplicación del tratamiento térmico por precipitación y envejecimiento en dicho material, tiene influencia directa en la dureza del material debido a que el tamaño del precipitado aumenta así como la cantidad de ellos en la matriz aumentan. Por otra parte también se observa en dicha gráfica que para el tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6) el porcentaje de área de precipitados es el mayor, mientras que el porcentaje de área de matriz de aluminio mayor se tiene para la condición de recocido (O). La variación de la microdureza de la matriz de aluminio se debe a que al realizar la indentación en dicha zona se apreciaban puntos negros de pequeño tamaño de siliciuros de magnesio.



**Figura 5.7** Comportamiento de las fases presentes en la aleación de acuerdo al tratamiento térmico aplicado.

### 5.10 Relación entre las propiedades a tracción, torsión y dureza con la evaluación microscópica y los tratamientos térmicos aplicados

La aleación de aluminio AA6063 para la condición de recocido (O) presentó propiedades mecánicas a tracción y torsión bajas, ya que para dicha condición no hay gran precipitación de siliciuros de magnesio, sin embargo en la evaluación

microscópica se observa la presencia de estos precipitados pero en una proporción pequeña en cuanto a área pero distribuidos uniformemente en toda la matriz de aluminio, esta característica es la responsable de que la ductilidad de la aleación para esta condición sea la mayor, a expensas de la disminución de la resistencia de la misma.

Para la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento natural (T4), se observa que las propiedades mecánicas son mayores con respecto a las obtenidas en recocido, esto se debe a que para dicha condición de tratamiento térmico se da la aparición en mayor proporción en términos de área porcentual de los precipitados de siliciuros de magnesio, los cuales representan un compuesto fino y duro en toda una matriz blanda y dúctil, al aparecer estos compuestos en la matriz impiden el movimiento de las partículas originando así un aumento de la resistencia de la aleación, esto a expensas de una disminución en la ductilidad.

Para la condición de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6), se observó de forma clara en la evaluación microscópica la presencia de mayor porcentaje de área de precipitados en la matriz, lo que trajo como consecuencia un aumento considerable en la resistencia mecánica de la aleación tanto a torsión como a tracción, así como un aumento de la dureza del material, ya que los precipitados poseen una dureza mayor a la de la matriz de aluminio, esto a expensas de una disminución de la ductilidad en tracción, para torsión la ductilidad experimenta un ligero aumento el cual convierte a dicho tratamiento térmico en el más adecuado para aplicaciones a torsión, ya que las propiedades mecánicas obtenidas son las mejores, así como la ductilidad es bastante buena.

Por último la condición de entrega (T5), arrojó propiedades mecánicas a tracción, torsión y dureza moderadamente altas, esto debido a que en la microestructura se observó mayor área porcentual de precipitados con respecto a la condición de recocido y T4, siendo esto lo que provoca el aumento de dichas propiedades, razón por la cual esta es la condición en la cual esta aleación se presenta comercialmente, ya que las propiedades mecánicas de resistencia son buenas.



## CONCLUSIONES

- Las propiedades mecánicas a tracción son afectadas directamente con la aplicación de los tratamientos térmicos, siendo el tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación y envejecimiento artificial (T6) el que presenta la mejor resistencia mecánica y el de recocido (O) el que presenta la mayor ductilidad.
- Los tratamientos térmicos T4 y T6, producen un incremento del esfuerzo fluencia en corte, esfuerzo cortante último y el módulo de corte, con una reducción de la deformación angular a la ruptura similar para ambas condiciones con respecto a la condición de recocido (O), estas condiciones confirman la disminución de la ductilidad que generan estos tratamientos.
- La dureza de la aleación AA6063 se incrementa con la aplicación de los tratamientos térmicos de endurecimiento y envejecimiento, esto se debe al endurecimiento por precipitación de los siliciuros de magnesio ( $Mg_2Si$ ) que experimenta la aleación, es por ello que para la condición de recocido la dureza de la aleación es la más baja, ya que allí la precipitación en área porcentual es menor.
- La relación entre el esfuerzo de fluencia a tracción y el esfuerzo de fluencia a corte disminuye con la aplicación de los tratamientos térmicos de endurecimiento por precipitación (de O a T6), siendo para estos tratamientos térmicos la relación entre dichos esfuerzos más cercana a la teoría de Von Mises, mientras que para la condición de recocido (O) la relación de los esfuerzos se aproxima más al criterio de Tresca.
- El endurecimiento por deformación que experimenta la aleación va disminuyendo con la aplicación de los tratamientos térmicos de precipitación,

siendo en el tratamiento térmico T6 casi nulo el endurecimiento por deformación, mientras que para la condición de recocido (O) el endurecimiento por deformación es mayor.

- Las probetas que fueron sometidas a torsión presentan gran deformación en la superficie, contrario a lo que sucede en el centro de las mismas, este efecto de la torsión en este tipo de muestras es típico, ya que teóricamente la deformación de las fibras debe ser proporcional al radio de la sección transversal.

## NOMENCLATURA

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>
$\sigma$	Esfuerzo real	MPa
<b>F</b>	Carga o fuerza	N
$A_0$	Área inicial	m <sup>2</sup>
<b>e</b>	Deformación unitaria	mm/mm
$L_F$	Longitud final de la probeta	mm
$L_0$	Longitud inicial de la probeta	mm
<b>E</b>	Módulo de elasticidad	MPa
<i>%alargamiento</i>	Porcentaje de alargamiento a la ruptura	porcentual
$A_0$	Área inicial	m <sup>2</sup>
$A_F$	Área final	m <sup>2</sup>
<i>%RA</i>	Porcentaje de reducción de área	porcentual
$\sigma_t$	Esfuerzo real	MPa
$A_i$	Área mínima de la sección transversal	m <sup>2</sup>
$\epsilon_t$	Deformación real	mm/mm
$l_i$	Longitud instantánea de la probeta	mm
$\phi$	Ángulo de torsión	rad/rad
<b>G</b>	Módulo de corte	GPa
<b>T</b>	Torque o momento torsor	N.m
<b>L</b>	Longitud calibrada de la probeta de torsión	mm
$I_P$	Inercia polar	m <sup>4</sup>
<b>R</b>	Radio de la probeta	mm
$\tau$	Esfuerzo cortante	MPa
$W_P$	Módulo resistente a la torsión	m <sup>3</sup>
$\gamma$	Distorsión angular	rad/rad
$\phi_L$	Deformación angular en la zona plástica	rad
$M_t$	Torque o momento torsor	N.m
<b>n</b>	Coefficiente de endurecimiento por deformación	adimensional

$M_0$	Momento torsor para una torsión unitaria	N.m
$P$	Carga o fuerza	N
$D$	Diámetro del indentador	mm
$d$	Diámetro de la indentación	mm
$\tau_{\max}$	Tensión de corte máxima	MPa
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Esfuerzos principales	MPa
$Y$	Esfuerzo de fluencia a tracción	MPa
$S$	Esfuerzo de fluencia a compresión plana	MPa
$K$	Esfuerzo de fluencia en corte puro	MPa
$\tau_{\text{oct}}$	Esfuerzo de corte octaedral	MPa

## RECOMENDACIONES

- Promover investigaciones relacionadas con ensayos de torsión en otros materiales de manera de generar así una base de datos acerca del comportamiento mecánico de diversos materiales en esta condición.
- Mejorar el sistema de adquisición de datos de la máquina de torsión en la zona elástica del material de manera de obtener un comportamiento más preciso en dicha zona.
- Realizar ensayos de torsión a diferentes temperaturas y velocidades de giro para observar la influencia que tienen dichos factores en las propiedades mecánicas resultantes.
- Realizar el pulido fino de las aleaciones de aluminio con sílica coloidal o pasta de diamante de manera de obtener una mejor superficie para el análisis metalográfico.



**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] Askeland, Donald R. (1987). *La Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (1era edición). México: Grupo Editorial Iberoamericana.
- [2] Cabello, S., Ollarves O. y Torres, M. (2009). *Ensayos de compresión y torsión: Una alternativa en la obtención de curvas Esfuerzo-Deformación Efectiva de materiales metálicos dúctiles*. XIBEROMET 2008. Cartagena de Indias, Colombia.
- [3] Dieter, G. E., *Mechanical Metallurgy*, 3era edición. Editorial Mc. Graw – Hill. (EE.UU), 2000. pp 323-329
- [4] Divo, J. y Kirhhof, R. (2006). *Construction and validation test of a torsion test machine*. Journal of materials processing technology. CLXXIX, 23 – 29.
- [5] Durán, C. y Hernández, N. (2007). *Efecto del tratamiento térmico de envejecimiento, aplicado a una aleación de aluminio AA6061 sobre sus propiedades mecánicas*. Trabajo de grado no publicado. Universidad de Carabobo, Valencia. Venezuela.
- [6] Groover, Mikell (1997). *Fundamentos de la Manufactura Moderna* (3era edición). México: Editorial Prentice Hall.
- [7] Nassinia, H. y otros. (2000). *Efecto de tratamientos térmicos post-síntesis sobre Las propiedades mecánicas de materiales compuestos De matriz metálica*. Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de fractura y fatiga.

- [8] Norma ASTM B221M-05 *Standard Specification for Aluminum and Aluminum Alloy Extruded*, American society for testing and materials, ASTM International. EE.UU (2005)
  
- [9] Norma ASTM B557-06, *Standard test methods for tensión testing wrought and cast – aluminum- and magnesium – alloy products*, American Society for Testing and Materials, ASTM International. EE.UU (2006)
  
- [10] Norma ASTM B918-01, *Standard Test Methods for Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloys*, American Society for Testing and Materials, ASTM International. EE.UU (2006).
  
- [11] Norma ASTM E140-05, *Standard Hardness Conversión Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knopp Hardness and Scleroscope Hardness*, American Society for Testing and Materials, ASTM International. EE.UU (2005)
  
- [12] Norma ASTM E18-05, *Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*, American Society for Testing and Materials, ASTM International. EE.UU (2006)
  
- [13] Norma ASTM E3-04, *Peperation of Metallographic Specimens*, American Society for Testing and Materials, ASTM International. EE.UU (2004)
  
- [14] Norma COVENIN 907:1997, *Alambre de Acero Método de Ensayo de Torsión Simple*. 2da Revisión. Comité Venezolano de Normas Industriales COVENIN, Caracas. (1997)
  
- [15] Palkovic, E. y Sáñez, F. (2006). *Diseño y construcción de una máquina para realizar ensayos de torsión*. Trabajo de grado no publicado, Universidad de Carabobo, Valencia.

- [16] Pereira, J., Durán L., Van Deventer, D. y Zambrano, J. (2009). *Comportamiento mecánico a torsión de la aleación de aluminio AA6061 tratada térmicamente*. Revista latinoamericana de metalurgia y materiales. S1(1): 183-190.
- [17] Ramírez, José L. (1989). *Bases para la Conformación de Metales*. Publicaciones Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.
- [18] Smith, William F. (2003). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. (3era edición). Madrid: Editorial McGraw - Hill.
- [19] Tassoni, Danilo (2005). *Elementos de Máquina* (1era edición). Universidad de Carabobo. Valencia
- [20] Totik, Y., Sadeler, R., Kaymaz, I. y Gavgali, M. (2003). *The effect of homogenisation treatment on cold deformations of AA 2014 and AA 6063 alloys*. Journal of Materials Processing Technology. 147 (2004) 60–64
- [21] Vedia, L. y Svoboda, H. (2001). *Teoría Ingenieril de Torsión*. Departamento de Ingeniería Mecánica y Naval. Buenos Aires, Argentina.

