



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación del comportamiento elastoplástico de la aleación de aluminio AA6063 envejecida en estado de esfuerzos de tracción, torsión y compresión axial.

**Tutor académico:**

Ing. Gennifer Aparicio

**Autores:**

Br. Jhosselyn Aranguren

Br. Laura Escalante

Naguanagua, Mayo de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación del comportamiento elastoplástico de la  
aleación de aluminio AA6063 envejecida en estado de  
esfuerzos de tracción, torsión y compresión axial.

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

**Tutor académico:**

Ing. Gennifer Aparicio

**Autores:**

Br. Jhosselyn Aranguren

Br. Laura Escalante

Naguanagua, Mayo de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación del comportamiento elastoplástico de la aleación de aluminio AA6063 envejecida en estado de esfuerzos de tracción, torsión y compresión axial.

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

Br. Jhosselyn Aranguren

Br. Laura Escalante

Naguanagua, Mayo de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la tesis de Pregrado titulada “**Evaluación del comportamiento elastoplástico de la aleación de aluminio AA6063 envejecida en estado de esfuerzos de tracción, torsión y compresión axial**”, presentada por los bachilleres: **Laura Escalante y Jhosselyn Aranguren**, portadores de la Cedula de Identidad N° 18.234.750 y 18.178.690, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

---

Prof. Gennifer Aparicio, Ing.  
Presidente del jurado

---

Miembro del jurado

---

Miembro del jurado

Naguanagua, Mayo de 2011



## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo agradecemos a dios por habernos acompañado durante todo este camino, iluminándonos sin dejarnos desfallecer ante las trabas que se nos presentaron en la realización de este trabajo de grado.

Agradecemos a nuestra tutora la profesora Gennifer Aparicio por brindarnos su apoyo y ayuda para la realización del mismo.

Al profesor Marcos Ciaccia por ofrecernos su tiempo y conocimiento adaptando un programa a las necesidades de nuestro trabajo de grado sin ser sus tesis.

Sra Alicia y Crisbel gracias por ayudarnos, tanto a nosotras como a todos los tesis en este proceso.

Por último pero no menos importante agradecemos mucho a una persona pequeña de tamaño pero grande de corazón, gracias señora Cira por su amistad y confianza, al habernos prestado por largo tiempo el material que necesitábamos para nuestros estudios así como para nuestra tesis.

## **DEDICATORIAS**

Primero antes que nada le doy gracias a Dios nuestro señor y le dedico este trabajo especial de grado, porque sin él no hubiera podido llegar hasta aquí y lograr alcanzar esta meta que es la primera de mi nueva etapa de vida como profesional. Por haberme dado paciencia, sabiduría, tolerancia, conocimientos y haberme guiado por este largo camino de momentos amargos (exámenes raspados), duros (materias aplazadas) y difíciles (obstáculos durante la tesis) sin dejarme desfallecer ni rendirme en ningún momento; gracias Dios por tu inmenso amor hacia esta hija, que te ha abandonado en muchos momentos, pero que a pesar de eso tú no me has abandonado a mí; gracias por acompañarme no solo en los momentos difíciles, sino también en los buenos momentos a lo largo de mi carrera (fiestas, viajes y reuniones con mis amigos).

Le dedico esta tesis a los padres más maravillosos del mundo, MIS PADRES (Migdalia y Eduardo), porque fueron pilar y base fundamental para que yo pudiera llegar a ser una ingeniero mecánico, gracias por sus grandes esfuerzos a lo largo de mi carrera, por acompañarme en esta etapa de mi vida, por los desayunos y almuerzos que entre ambos me prepararon, por su innegable esmero y dedicación para que yo fuera una profesional; gracias por haberme educado tan bien como lo hicieron, por querer siempre darme lo mejor y desearme lo mejor, por siempre inspirarme y apoyarme para que siguiera adelante en los momentos de rabia y estrés, por todo su amor, cariño, unión y comprensión. Le doy gracias a Dios por haberme dado unos padres como ustedes. LOS AMO y este triunfo es de ustedes. Debe hacer aquí un paréntesis porque yo tengo la dicha de no solo tener mis padres biológicos, sino también unos padres adoptivos, porque tengo que decir que la señora Cecilia y el señor Arturo fueron como unos padres para mí a lo largo de toda mi carrera, brindándome su hogar, su ayuda y su apoyo en incontables momentos de estudios, gracias a



ambos por su cooperación en mi carrera. A mis abuelos tíos y primos porque forman parte del núcleo familiar y de alguna u otra manera aportaron un poco de ayuda para lograr esta meta.

Por último pero no menos importante le dedico esta tesis a mis amigos, porque a pesar de que una persona me ha dicho que uno no tiene amigos sino que tus amigos son tu familia, yo puedo decir que si tengo amigos unos excelentes amigos que siempre están pendiente de mantenernos en contacto y me reclaman y regañan cuando los tengo abandonados y botados sin llamarlos. Gracias Corina, Luisa, Stevens, Williams, Denny, Leo, Deric, porque cada uno de ustedes aportó un granito de arena en las clases y momentos de estudios para lograr llegar a este momento, son unos grandes amigos y espero siempre mantenernos unidos como hasta ahora. Aunque ellos no son mis únicos amigos son los más allegados, gracias Gaby, Pocho, Rafa y Sergio, gracias a todos los muchachos que durante toda mi carrera me brindaron su amistad, ayuda y apoyo.

Jhosselyn Aranguren



A mis padres por sus consejos, por no permitir que me amilanara durante los momentos difíciles, gracias a ustedes cumplí esta meta.

A mis hermanos por su apoyo y ayuda, Raquel gracias por tu compañía y paciencia; Dany gracias por las risas y Diana gracias por los consejos, los amo.

A mi abuelito por su bendición, por preguntar “flaca como te fue en el colegio” después de un largo día de clases.

A mi compañera de tesis y amiga Jhosselyn; quien junto a mis peques, Gaby y Luisa compartieron los momentos más alegres y los más duros de esta carrera, Gracias por su amistad.

A Carlos Daniel por estar ahí cuando más lo necesite, por su compañía, por cambiar lágrimas por risas y sobre todo por aguantar mis malos momentos.

Y por ultimo pero no menos importante a mis amigos, a esas personas que compartieron conmigo el salón de clases, las largas jornadas de estudio, los parciales y los que celebraron el fin de estos; gracias diosito por ponerlos en mi camino, los quiero a todos.

Laura Escalante

## RESUMEN

Entre las aleaciones de aluminio más utilizadas y producidas en Venezuela se encuentra la AA-6063. Para el estudio de los procesos de conformado y aplicaciones industriales de esta aleación es necesario contar con expresiones que permitan modelar el comportamiento elastoplástico de la misma. Una herramienta para conocer dicho comportamiento son las curvas esfuerzo-deformación. Por ello en esta investigación se evaluó dicho comportamiento utilizando las ecuaciones de Mirambell-Real y la aproximación explícita de Abdella. Las curvas usadas fueron obtenidas experimentalmente por nosotras. El ajuste de parámetros se llevo a cabo mediante el método de mínimos cuadrados lineal y no lineal. Se obtuvo que los ajustes para el exponente “m” de Mirambell-Real presentan un coeficiente de correlación de 91% y 93% para las distintas ecuaciones, con lo cual se puede decir que el modelo ajustado representa una buena aproximación a la curva experimental de los ensayos de tracción, pero presenta muchas variaciones en la zona plástica de los ensayos de compresión y torsión.

Palabras clave: Comportamiento elastoplástico, esfuerzo, deformación.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	ix
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xiii
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	xvii
<b>NOMENCLATURA</b> .....	xix
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	1
<b>DEDICATORIA</b> .....	3
<b>RESUMEN</b> .....	7
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	9
<b>CAPÍTULO I. EL PROBLEMA</b>	
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.2 OBJETIVOS	
1.2.1 Objetivo General .....	13
1.2.2 Objetivos Específicos.....	13
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	13
1.4 LIMITACIONES .....	14
1.5 ALCANCE .....	14
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	15



2.2 BASES TEÓRICAS .....	17
2.3 ECUACIONES ESFUERZO-DEFORMACIÓN .....	20
2.4 AJUSTES.....	31
2.4.1 Ajuste por Mínimos Cuadrados Lineal.....	32
2.4.2 Ajuste por Mínimos Cuadrados no Lineal.....	34
2.5 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN.....	35
2.6 CORRECCIÓN POR BRIDGMAN EN EL ENSAYO DE TRACCIÓN.....	37
2.7 CORRECCIÓN POR FRICCIÓN PARA EL ENSAYO DE COMPRESIÓN CILÍNDRICA .....	40

### **CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO**

3.1 MATERIALES.....	45
3.1.1 Características y preparación del material.....	45
3.1.2 Condiciones de ensayo .....	46
3.1.3 Preparación de probetas según normas.....	47
3.2 NOMENCLATURA DE LAS PROBETAS .....	49
3.3 ENSAYOS MECÁNICOS .....	49
3.3.1 Ensayos de tracción.....	49
3.3.2 Ensayos de compresión axial.....	50
3.3.3 Ensayos de torsión .....	50
3.4 AJUSTES DE PARÁMETROS DE ECUACIONES CONSTITUTIVAS UNIAXIALES.....	50
3.5 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN .....	53
3.6 CÁLCULO DE LA CORRECCIÓN DE BRIDGMAN.....	53

### **CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN.....	55
4.2 CORRECCIÓN DE BRIDGMAN .....	57



4.3 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE MIRAMBELL-REAL Y ABDELLA .....	63
4.4 OBTENCIÓN DE LA ECUACIÓN DEL EXPONENTE “M” DE MIRAMBELL- REAL .....	66
4.5 COMPARACIÓN DE LAS CURVAS ESFUERZ-DEFORMACIÓN EXPERIMENTAL CON LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS EVALUADOS .....	70
4.5.1 Curvas esfuerzo-deformación efectiva a tracción .....	71
4.5.2 Curvas esfuerzo-deformación efectiva a compresión .....	77
4.5.3 Curvas esfuerzo-deformación efectiva a torsión .....	83
4.6 ERRORES ENTRE LA CURVA EXPERIMENTAL Y LOS MODELOS DE MIRAMBELL-REAL Y ABDELLA .....	70
 <b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
CONCLUSIONES .....	93
RECOMENDACIONES .....	95
<b>REFERENCIAS</b> .....	97

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Clasificación según grado de coeficiente de correlación .....	36
<b>Tabla 3.1.</b> Composición química de la aleación de aluminio 6063 .....	46
<b>Tabla 3.2.</b> Condiciones de ensayo de las probetas .....	46
<b>Tabla 4.1.</b> Valores de presión media para cada relación de esbeltez con $e=0,1$ .....	56
<b>Tabla 4.2.</b> Valores de esfuerzo máximo, esfuerzo de Bridgman, deformación máxima y deformación de Bridgman para cada ensayo de tracción .....	57
<b>Tabla 4.3.</b> Porcentaje de reducción de área de las probetas de tracción .....	63
<b>Tabla 4.4.</b> Parámetros de la ecuación de Ramberg-Osgood y Mirambell-Real .....	64
<b>Tabla 4.5.</b> Parámetros de la ecuación de Abdella .....	65
<b>Tabla 4.6.</b> Valores de “m” y “ $S_{0,2}/S_u$ ” para cada ensayo.....	66
<b>Tabla 4.7.</b> Valores de “m” y de correlación según las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3.....	69
<b>Tabla 4.7.</b> Valores de correlación, máximos errores y puntos de deformación donde se encuentran.. .....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Diagrama esfuerzo-deformación de materiales dúctiles.....	21
<b>Figura 2.2.</b> Representación genérica de la curva tensión-deformación por medio de la ecuación de Ramberg-Osgood .....	25
<b>Figura 2.3.</b> Curva típica de esfuerzo-deformación y aproximación de Ramberg y Osgood.....	27
<b>Figura 2.4.</b> Curva esfuerzo-deformación, deducción de Real-Mirambell.....	28
<b>Figura 2.5.</b> Curva para la determinación del esfuerzo a la fractura corregido mediante la corrección de Bridgman .....	40
<b>Figura 2.6.</b> Estado de esfuerzos presentes en el ensayo de compresión cilíndrica...	41
<b>Figura 2.7.</b> Ensayos de compresión a diferentes relaciones de esbeltez para la determinación del coeficiente de fricción .....	43
<b>Figura 2.8.</b> Curva $p$ vs. $d_0/h_0$ para una deformación constante e igual a la unidad...	44
<b>Figura 3.1.</b> Probeta cilíndrica según norma ASTM E-8M.....	47
<b>Figura 3.2.</b> Probeta cilíndrica según norma ASTM E9-89 .....	48
<b>Figura 3.3.</b> Probeta para torsión según norma COVENIN 907-1997 .....	48
<b>Figura 3.4.</b> Nomenclatura de las probetas.....	49
<b>Figura 3.5.</b> Pendiente de la zona elástica “ $E_0$ ” .....	51
<b>Figura 3.6.</b> Método “offset” aplicado a la curva esfuerzo-deformación .....	52
<b>Figura 3.7.</b> Valor de deformación constante establecido para el cálculo del coeficiente de fricción.....	53



<b>Figura 4.1.</b> Gráfico presión media vs deformación ingenieril para distintas relaciones de esbeltez, utilizando bisulfuro de molibdeno.....	55
<b>Figura 4.2.</b> Gráfico presión media vs relación de esbeltez.....	56
<b>Figura 4.3.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción sin envejecimiento .....	58
<b>Figura 4.4.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción sin envejecimiento .....	58
<b>Figura 4.5.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción sin envejecimiento .....	59
<b>Figura 4.6.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción sin envejecimiento .....	59
<b>Figura 4.7.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción sin envejecimiento .....	60
<b>Figura 4.8.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción con envejecimiento .....	60
<b>Figura 4.9.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción con envejecimiento .....	60
<b>Figura 4.10.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción con envejecimiento .....	61
<b>Figura 4.11.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción con envejecimiento .....	62
<b>Figura 4.12.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción con envejecimiento .....	62
<b>Figura 4.13.</b> Ajuste por mínimos cuadrados lineal de “m” para ensayos de torsión y compresión sin tratamiento térmico.....	67



<b>Figura 4.14.</b> Ajuste por mínimos cuadrados lineal de “m” para todos los ensayos con tratamiento térmico .....	67
<b>Figura 4.15.</b> Ajuste por mínimos cuadrados lineal de “m” para todos los ensayos de tracción sin tratamiento térmico .....	68
<b>Figura 4.16.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción sin envejecimiento.....	71
<b>Figura 4.17.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción sin envejecimiento.....	71
<b>Figura 4.18.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción sin envejecimiento.....	72
<b>Figura 4.19.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción sin envejecimiento.....	72
<b>Figura 4.20.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción sin envejecimiento.....	73
<b>Figura 4.21.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción con envejecimiento.....	73
<b>Figura 4.22.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción con envejecimiento.....	74
<b>Figura 4.23.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción con envejecimiento.....	74
<b>Figura 4.24.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción con envejecimiento.....	75
<b>Figura 4.25.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a tracción con envejecimiento.....	75

<b>Figura 4.26.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a compresión sin envejecimiento .....	77
<b>Figura 4.27.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a compresión sin envejecimiento .....	77
<b>Figura 4.28.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a compresión sin envejecimiento .....	78
<b>Figura 4.29.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a compresión sin envejecimiento .....	78
<b>Figura 4.30.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a compresión sin envejecimiento .....	79
<b>Figura 4.31.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a compresión con envejecimiento .....	79
<b>Figura 4.32.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a compresión con envejecimiento .....	80
<b>Figura 4.33.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a compresión con envejecimiento .....	80
<b>Figura 4.34.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a compresión con envejecimiento .....	81
<b>Figura 4.35.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a compresión con envejecimiento .....	81
<b>Figura 4.36.</b> Imagen de las probetas de compresión cilíndricas cortadas transversalmente .....	82
<b>Figura 4.37.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a torsión sin envejecimiento .....	83



<b>Figura 4.38.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a torsión sin envejecimiento.....	83
<b>Figura 4.39.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a torsión sin envejecimiento.....	84
<b>Figura 4.40.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a torsión sin envejecimiento.....	84
<b>Figura 4.41.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a torsión sin envejecimiento.....	85
<b>Figura 4.42.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a torsión con envejecimiento.....	85
<b>Figura 4.43.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a torsión con envejecimiento.....	86
<b>Figura 4.44.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a torsión con envejecimiento.....	86
<b>Figura 4.45.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a torsión con envejecimiento.....	87
<b>Figura 4.46.</b> Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo a torsión con envejecimiento.....	87
<b>Figura 4.47.</b> Valor de deformación donde el error es máximo para un ensayo de torsión .....	89
<b>Figura 4.48.</b> Punto donde la curva comienza a diferenciarse de la experimental para un ensayo de compresión.....	89



## INTRODUCCIÓN

El aluminio es un metal que posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería mecánica, tales como su baja densidad y su alta resistencia a la corrosión. Mediante aleaciones adecuadas se puede aumentar sensiblemente su resistencia mecánica (hasta los 690 MPa). Es buen conductor de la electricidad y del calor, se mecaniza con facilidad y es relativamente económico.

Existe una gran cantidad de aleaciones de aluminio, entre las cuales se encuentra la AA6063. Esta es utilizada para la fabricación de marcos, tanto de ventanas como de puertas, tuberías y muebles arquitectónicos, debido a sus propiedades; ya que esta aleación presenta una resistencia mecánica moderada, es fácil de soldar al arco en atmósfera inerte o por soldadura fuerte, posee una excelente resistencia a la corrosión, buena formabilidad y excelentes características para ser anodizada.

Para definir el comportamiento de la aleación de aluminio 6063 se deben contar con expresiones que permitan conocer los cambios que este sufre al ser deformado, es por esto que en este trabajo se ajustaron las ecuaciones propuestas por Mirambell-Real y Abdella para ser aplicadas con las aleaciones de aluminio, ya que las mismas fueron desarrolladas para trabajar con acero inoxidable.

Este trabajo especial de grado está estructurado de la siguiente forma:

Capítulo I: Planteamiento del problema. En este se desglosa la situación problemática, los objetivos planteados, limitaciones y alcance.



Capítulo II: Marco teórico, en el cual se contemplan los antecedentes del trabajo, las ecuaciones utilizadas.

Capítulo III: Marco metodológico, se especifica toda la metodología empleada en la elaboración de los ensayos y ajustes de parámetros de las ecuaciones.

Capítulo IV: Resultados obtenidos, allí se muestran los resultados de los modelos de las curvas de los ensayos realizados.

Capítulo V: Análisis de resultados, es esta sección se discute los valores obtenidos.

Finalmente se plantean las conclusiones, recomendaciones y una lista de referencias bibliográficas.



## CAPÍTULO I

### EL PROBLEMA

#### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde el punto de vista físico, el aluminio puro posee una resistencia muy baja a la tracción y una dureza escasa. En cambio, unido en aleación con otros elementos, el aluminio adquiere características mecánicas muy superiores. Existen actualmente centenares de aleaciones diferentes, entre las cuales podemos mencionar la aleación 6063, debido a su gran facilidad de extrusión.

Las propiedades mecánicas de los materiales utilizados para diversas aplicaciones dependen de su microestructura; los tratamientos térmicos y los procesos de conformado en frío modifican dicha microestructura. Por lo que es de gran importancia el estudio de la influencia que ellos tienen en las aleaciones. El envejecimiento se realiza con el objetivo de aumentar la resistencia de muchas aleaciones de aluminio y crear en una aleación tratada térmicamente una dispersión densa y fina de partículas precipitadas en una matriz de metal deformable, reforzando la aleación tratada térmicamente.

Para el estudio de los procesos de conformado y aplicaciones industriales de esta aleación, es bueno contar con expresiones que permitan ajustar su comportamiento elastoplástico. Una manera convencional de conocer este comportamiento, es mediante las curvas de esfuerzo deformación, las cuales pueden ser parametrizadas por diferentes modelos esfuerzo-deformación real, tales como: la *Ley de Hollomon* y *Swift*.

En este campo se han realizado diferentes estudios como: *Ramberg* y *Osgood* (1943) en el comportamiento de las aleaciones de aluminio a través de una ecuación que consta de tres parámetros; *Hill* (1945) complementando la ecuación de los autores



anteriores, utilizando dos valores de fluencia por medio del método de desplazamiento “offset”, donde se determina un esfuerzo para cada valor de deformación; *Rasmussen (2001)* aplicando dicho modelo para el caso de los aceros inoxidable y redefiniendo la expresión con la finalidad de evaluar el comportamiento en la zona plástica, *Mirambell-Real* con la discusión en cuanto a la ecuación desarrollada por Rasmussen, *Abdella (2006)* con la aproximación a una formulación inversa de dos etapas basada en la ecuación de Ramberg-Osgood para aceros inoxidable; los modelos mencionados anteriormente pueden ser usados para ensayos de tracción y compresión.

Debido a que en el Laboratorio de Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica se requieren modelos sencillos de ecuaciones para estudiar el comportamiento elastoplástico de los materiales, obteniendo valores con un porcentaje de error considerablemente bajo de la curva esfuerzo-deformación ingenieril, en esta investigación se trabajó en el ajuste de parámetros para aleaciones de aluminio 6063, utilizando los modelos de Mirambell-Real y la aproximación explícita de Abdella, con la finalidad de obtener una expresión que pueda usarse como modelo matemático para predecir la forma de la curva esfuerzo-deformación ingenieril en ensayos de tracción, torsión y compresión axial, para así conocer la respuesta en función de la deformación. Es importante resaltar que estos modelos no han sido implementados en ensayos de torsión.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 General**

Evaluar el comportamiento elastoplástico de la aleación de aluminio AA6063 envejecida en estado de esfuerzos de tracción, torsión y compresión axial.

### 1.2.2 Específicos

- Determinar las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio AA-6063 a partir de ensayos de tracción, torsión y compresión en condiciones originales y con el material envejecido.
- Obtener las curvas esfuerzo - deformación efectiva para cada condición de ensayo, considerando para ello las correcciones de Bridgman en el ensayo de tracción y la corrección por fricción en el ensayo de compresión.
- Parametrizar la curva esfuerzo - deformación efectiva según los modelos de Hollomon, Mirambell - Real y Abdella.
- Comparar los resultados obtenidos en función de las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de tracción, compresión y torsión y según los modelos utilizados para modelar la curva esfuerzo - deformación efectiva.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

Las curvas esfuerzo-deformación son de gran importancia a la hora de determinar el endurecimiento por deformación que experimenta el material, las mismas son empleadas en modelos matemáticos para el análisis de problemas de plasticidad, tales como los procesos de conformado de metales, con el fin de conocer el comportamiento y las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6063 que son de gran importancia en la industria.

Con esta investigación se obtuvo una expresión sencilla que permitió aproximar la curva esfuerzo-deformación a los valores reales para la aleación de aluminio 6063 según las ecuaciones de Mirambell-Real y las aproximaciones de Abdella, minimizando así los errores obtenidos con los métodos anteriores; igualmente sirve para ser aplicada en las prácticas de Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.



#### 1.4 LIMITACIONES

- Disponibilidad de la aleación de aluminio 6063.
- Disponibilidad de equipos necesarios para realizar las probetas a ensayar.
- Disponibilidad de los equipos de ensayo.

#### 1.5 ALCANCE

Se realizó la evaluación del comportamiento elastoplástico utilizando los modelos de Mirambell-Real y Abdella para la aleación de aluminio 6063, donde fue evaluado experimentalmente por medio de ensayos a tracción, torsión y compresión axial. Se efectuaron un total de 55 ensayos, 40 ensayos con 8 condiciones, siendo estos los siguientes: ensayo de tracción, 5 ensayos con las probetas envejecidas y 5 ensayos con las probetas sin envejecer; ensayo de torsión, 5 ensayos con las probetas envejecidas y 5 ensayos con las probetas sin envejecer; ensayo de compresión, 10 ensayos con las probetas realizadas longitudinalmente y 10 ensayos con las probetas realizadas transversalmente, ambas condiciones subdivididas en 5 ensayos con las probetas envejecidas y 5 ensayos con las probetas sin envejecer. Se realizaron también las correcciones de Bridgman en el ensayo de tracción y la corrección por fricción en el ensayo de compresión, para este último, se efectuaron 15 ensayos previos para calcular el coeficiente de fricción en la aleación de aluminio 6063 lubricada con Bisulfuro de Molibdeno.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.

Desde hace algunos años se ha venido trabajando en el desarrollo de expresiones que permiten conocer el comportamiento de materiales a diversas pruebas como tracción, torsión y compresión, entre otras.

Ramberg y Osgood (1943) desarrollaron una ecuación para el comportamiento de las aleaciones de aluminio, la cual consta de tres parámetros que indican la relación entre esfuerzos y deformaciones hasta esfuerzos ligeramente mayores al esfuerzo de fluencia del material.

Seguido de este desarrollo Hill (1945) complementa la ecuación haciendo el estudio de la expresión desarrollada por los autores anteriores, utilizando dos valores de fluencia por medio del método offset, donde determina un esfuerzo para cada valor de deformación; la expresión no varía considerablemente.

Mirambell y Real (2000) proponen una nueva ecuación, la cual se obtuvo al mover los ejes de referencia desde el origen hasta el punto correspondiente al 0,2% en la curva esfuerzo-deformación, para luego utilizar la ecuación de Ramberg Osgood, queriendo con esto disminuir el error para los valores de carga mayores al esfuerzo de prueba en los ensayos de acero inoxidable.

Chryssanthopoulos y Low (2001) desarrollaron un método para predecir la respuesta a la flexión de miembros tubulares, con características de esfuerzo-deformación no lineales. En términos de carga, decidieron concentrarse en la flexión pura, generada por dos puntos simétricos de carga de una viga simplemente apoyada.



Posteriormente Rasmussen (2003) aplicó este modelo para el caso de aceros inoxidables, el cual posee una curva esfuerzo-deformación similar en forma a la del aluminio, percibió que la ecuación de Ramberg-Osgood es válida en el desarrollo de la zona elástica de la curva esfuerzo-deformación, pero que no puede extenderse a valores de esfuerzo mayores al de fluencia. Por esta razón decidió redefinir la expresión con la finalidad de evaluar el comportamiento en la zona plástica, sin que la ecuación deje de ser precisa. Es por ello que dicho autor propuso para la zona elástica la ecuación de Ramberg-Osgood y para la zona plástica otra expresión que vincula la deformación y esfuerzos al 0,2%.

Luego de este planteamiento, surgió una discusión por parte de los autores Mirambel y Real, en cuanto a la ecuación desarrollada por Rasmussen, ya que ellos trabajaron anteriormente de forma independiente sobre la expresión de Ramberg y Osgood, sólo que los primeros trasladaron el eje de referencia hasta el punto de esfuerzo correspondiente al 0,2% y determinaron una expresión que describe el comportamiento para la zona plástica de la curva esfuerzo-deformación, la cual es muy similar a la redefinida por el segundo.

Seguidamente, Abdella (2006), presentó una aproximación a una formulación inversa de dos etapas basada en la ecuación de Ramberg y Osgood para aceros inoxidables, la cual puede ser usada para tracción y compresión.

Ciaccia, *et al* (2007) trabajaron en el ajuste de la ecuación de Rasmussen para las aleaciones de aluminio 2024, 3003, 6061 y 6063. Donde se evalúa el comportamiento elastoplástico para diferentes aleaciones de aluminio usando las ecuaciones de Ramberg Osgood y Rasmussen. Se utilizaron curvas obtenidas experimentalmente y de literatura; los parámetros fueron ajustados utilizando el método de mínimos cuadrados lineal y no lineal. Se obtuvo que los ajustes para el exponente “m” de Rasmussen presenta un coeficiente de correlación superior al 93%, y las correlaciones de  $S_u$  y  $e_u$  proporcionan un error muy mínimo, siendo el modelo

ajustado una herramienta adecuada para la descripción del comportamiento elastoplástico de las aleaciones de aluminio evaluadas.

Cabello y Torres (2006) presentaron una metodología para obtener las curvas esfuerzo-deformación efectiva de materiales metálicos dúctiles haciendo uso de ensayos de compresión y torsión, como una alternativa frente a los ensayos convencionales de tracción. Desarrollaron también ecuaciones que permiten la corrección de las curvas esfuerzo-deformación efectiva obtenidas en ensayos de compresión plana y cilíndrica por efectos de la fricción existente en la interface muestra-herramienta. En esta investigación también se describe un procedimiento basado en la corrección de Bridgman para compensar el efecto de la estricción localizada durante los ensayos de tracción en muestras de sección circular, con lo que puede lograrse un incremento significativo en el intervalo de deformaciones obtenidas.

Sáenz y De Frenza (2006) presentaron un estudio del comportamiento mecánico de la aleación de aluminio AA-6063 sometida a un tratamiento térmico de envejecimiento. Las condiciones originales del material fueron barras cuadradas de lado  $L=5/8''$  y  $3/4''$ , fabricadas mediante un proceso de extrusión. Realizaron ensayos de tracción, Charpy y dureza Vickers ( $P=50g.$ ).

## **2.2 BASES TEÓRICAS.**

El aluminio es un elemento químico dúctil, no soluble en agua, se trata de un metal no ferromagnético. Es el metal más abundante sobre la corteza terrestre, y el tercer elemento más abundante después del oxígeno y el silicio. Los compuestos de aluminio forman el 8% de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, de la vegetación y de los animales. En estado natural se encuentra en muchos silicatos. Como metal se extrae únicamente del mineral conocido con el nombre de bauxita, por transformación primero en alúmina mediante el proceso Bayer y a continuación en aluminio metálico mediante electrólisis.



Este metal posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería mecánica. Es buen conductor de la electricidad y del calor, se mecaniza con facilidad y es relativamente económico, una de las mayores ventajas del aluminio es que puede ser reciclado una y otra vez sin perder su calidad ni sus propiedades. Por todo ello es desde mediados del siglo XX el metal que más se utiliza después del acero.

Los componentes estructurales hechos de aluminio y sus aleaciones, son vitales en la industria aeroespacial y muy importantes en otras áreas del transporte y construcción. Capas delgadas de aluminio depositadas sobre una superficie plana de cristal por medio de deposición física o química de vapor, sirven para crear espejos y superficies reflectantes. Este es un componente vital en la aeronáutica y cohetes como resultado de su relación de peso y fuerza.

Fue aislado de las rocas que lo contenían por primera vez en 1825 por el químico danés Hans Christian Oersted, por medio de un proceso químico que utilizaba una amalgama de potasio y cloruro de aluminio. El principal inconveniente para su obtención reside en la elevada cantidad de energía eléctrica que requiere su producción. Este problema se compensa por su bajo coste de reciclado, su dilatada vida útil y la estabilidad de su precio.

Ya sea considerando la cantidad o el valor del metal empleado, el uso industrial del aluminio excede al del cualquier otro metal exceptuando el hierro / acero. Es un material importante en multitud de actividades económicas y ha sido considerado un recurso estratégico en situaciones de conflicto.

Los valores característicos que se obtienen en el ensayo de tracción para juzgar las propiedades resistentes de los materiales metálicos en general, son aplicables a los materiales de aluminio. Generalmente estos valores son el límite elástico 0,2%, la resistencia máxima a la tracción, el alargamiento a la rotura, así como la estricción de ruptura.

En general, la resistencia aumenta con el aumento en elementos de aleación. Los dominios de la resistencia en cada aleación surgen, ante todo, como consecuencia de los aumentos de resistencia que se consiguen por deformación en frío o endurecimiento por tratamiento térmico. Los distintos elementos de aleación actúan de modo muy diferente en cuanto al aumento de resistencia.

Al aumentar la resistencia, aumenta el límite 0,2% más deprisa que la resistencia a la tracción, independientemente del mecanismo que motive el aumento de la resistencia. Este aumento se nota especialmente cuando el aumento de resistencia tiene lugar por deformación en frío. En general no se desean altas relaciones entre los límites elásticos (límite 0,2% y resistencia máxima) ya que expresan un comportamiento relativamente quebradizo del material, razón fundamental por la que no se puede aumentar de forma arbitraria la resistencia de un material metálico. Aluminio (2009)

En los materiales aluminicos se puede admitir que el valor del límite de aplastamiento 0,2% (parámetro de la resistencia a la compresión) es igual al valor del límite elástico 0,2% de tracción. La resistencia a la compresión o el límite de aplastamiento 0,2% tienen importancia principalmente en las piezas sometidas a compresión tales como cojinetes de fricción.

La resistencia a la flexión en las aleaciones de aluminio se tiene en cuenta para las de fundición, en aquellos casos en que, al realizar el ensayo de tracción no es posible determinar el límite elástico con suficiente exactitud a causa de su pequeño valor.

La resistencia al cizallamiento es importante para el cálculo de la fuerza necesaria para el corte y para determinadas construcciones. No existen valores normalizados. Generalmente está entre el 55 y 80 % de la resistencia a la tracción.

Casi nunca se determina la resistencia a la torsión, si se considera una distribución lineal de esfuerzos.



### 2.3 ECUACIONES ESFUERZO-DEFORMACIÓN.

Las fuerzas internas de un elemento están ubicadas dentro del material por lo que se distribuyen en toda el área; justamente se denomina esfuerzo a la fuerza por unidad de área, la cual se denota con la letra griega sigma ( $\sigma$ ) y es un parámetro que permite comparar la resistencia de dos materiales, ya que establece una base común de referencia. Matemáticamente el esfuerzo sería:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Donde:

P= Fuerza axial (N).

A= Área de la sección transversal (mm).

La resistencia del material, no es el único parámetro que debe utilizarse al diseñar o analizar una estructura; controlar las deformaciones para que la estructura cumpla con el propósito para el cual se diseñó tiene la misma o mayor importancia. El análisis de las deformaciones se relaciona con los cambios en la forma de la estructura que generan las cargas aplicadas.

Una barra sometida a una fuerza axial de tracción aumentará su longitud inicial; se puede observar que bajo la misma carga pero con una longitud mayor este aumento o alargamiento se incrementará también. Por ello definir la deformación ( $\varepsilon$ ) como el cociente entre el alargamiento y la longitud inicial, indica que sobre la barra la deformación es la misma porque si aumenta  $L$  también aumentaría  $\delta$ . Matemáticamente la deformación sería:

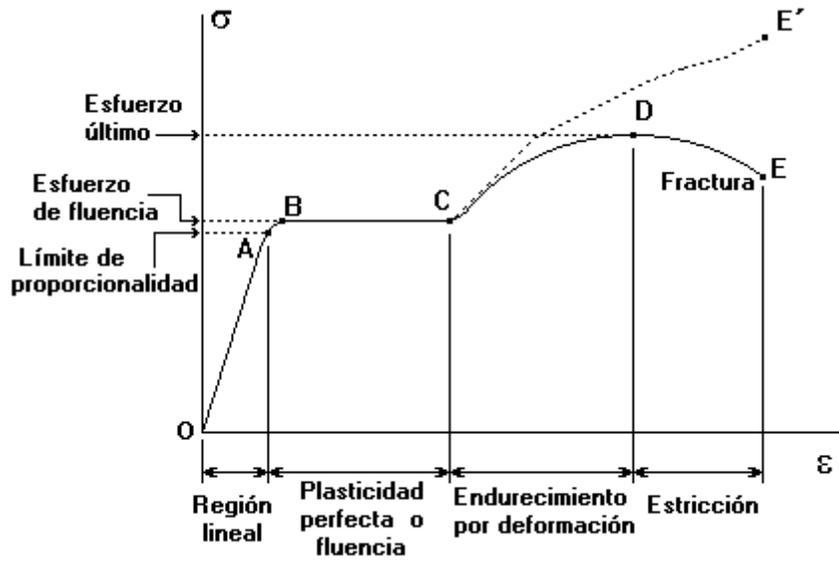
$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2.2)$$

Donde:

$\delta$ = Alargamiento (mm).

L= Longitud inicial (mm).

En el diagrama esfuerzo – deformación figura 2.1, la línea recta en la región lineal indica que la deformación es directamente proporcional al esfuerzo en el tramo elástico, este principio es conocido como la Ley de Hooke (ecuación 2.3). Asimismo, la proporción representada por la pendiente de la recta, es constante para cada material y se llama módulo de elasticidad ( $E$ ), valor que representa su rigidez.



**Figura 2.1.** Diagrama esfuerzo-deformación de materiales dúctiles. *Fuente: ensayo de tracción en metales (2010)*

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

Donde:

$\sigma$ = Esfuerzo (MPa).

$\varepsilon$ = Deformación (mm/mm)

Una de las ecuaciones empíricas más comunes que describe el comportamiento plástico de los materiales dúctiles, debido a que ajusta de una manera más satisfactoria y simple los esfuerzos y las deformaciones, es la ecuación de Hollomon:



$$\sigma = \sigma_0 \varepsilon^m \quad (2.4)$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo real,  $\sigma_0$  y  $m$  son el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación de Hollomon, respectivamente, y  $\varepsilon$  es la deformación real.

Las variables  $\sigma$  y  $\varepsilon$  definen cada uno de los puntos de la curva esfuerzo-deformación real del material recocido. El coeficiente  $\sigma_0$  es el esfuerzo real para producir una deformación real unitaria y el exponente “ $m$ ” es una medida de la capacidad de endurecimiento por deformación del material, ambos valores, que se reportan como propiedades de los metales, varían para cada aleación y dependen de la condición del material. Una de las utilidades prácticas de esta expresión matemática es que permite estimar la formabilidad del material al considerar la magnitud del exponente de endurecimiento  $m$  en la ecuación (2.4).

La ecuación de Hollomon también se define como el lugar geométrico de todos los valores posibles que puede alcanzar el límite de fluencia de un metal mediante deformación plástica. Cuando el material tiene trabajo en frío, el esfuerzo de fluencia se puede determinar teóricamente utilizando la ecuación de Hollomon del material recocido de la siguiente manera:

$$S_{yw} = \sigma_{yw} = \sigma_0 \varepsilon_w^m \quad (2.5)$$

Donde  $S_{yw}$  y  $\sigma_{yw}$  son la resistencia y el esfuerzo real a fluencia respectivamente del material trabajado en frío,  $\varepsilon_w$  es la deformación real del trabajo en frío. Este conocimiento es de gran importancia ya que, al diseñar, se puede estimar el esfuerzo de fluencia resultante de la pieza fabricada mediante deformación plástica. Sin embargo, la discrepancia de los valores calculados del esfuerzo de fluencia, con respecto a los experimentales, ha sido motivo de estudio debido a su importancia en el diseño ingenieril.

Otro modelo muy utilizado es el de Ramberg y Osgood, quienes desarrollaron una ecuación de tres parámetros (Ec. 2.6) que expresa la relación entre esfuerzos y

deformaciones hasta esfuerzos ligeramente mayores al esfuerzo de fluencia del material.

$$e = \frac{S}{E_0} + 0,002 \left( \frac{S}{S_{0,2}} \right)^n \quad (2.6)$$

Donde  $S$  y  $e$  son el esfuerzo ingenieril y la deformación ingenieril, respectivamente,  $E_0$  es el módulo de elasticidad del material y  $S_{0,2}$  es el esfuerzo de prueba para la deformación según el método de desplazamiento “*offset*” del 0,2%.

El parámetro  $n$  puede ser evaluado mediante el uso de dos esfuerzos de prueba determinados mediante el método de desplazamiento “*offset*”, y es de práctica común utilizar 0,01% y el 0,2%, para lo cual se obtiene la ecuación 2.7:

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln\left(\frac{S_{0,2}}{S_{0,01}}\right)} \quad (2.7)$$

La ecuación de Ramberg y Osgood fue creada para describir la relación no lineal entre el esfuerzo y la deformación, es decir, la curva esfuerzo-deformación de los materiales cerca de sus puntos de fluencia. Es especialmente útil para los metales que se endurecen con la deformación plástica, mostrando una suave transición de elástico a plástico. En su forma original, la ecuación para la deformación es:

$$e = \frac{\sigma}{E} + K \left( \frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (2.8)$$

En la ecuación 2.8, el primer término en el lado derecho,  $\sigma/E$ , es igual a la parte elástica de la deformación, mientras que el segundo término,  $K(\sigma/E)^n$ , representa la parte plástica, los parámetros  $K$  y  $n$ , describen el comportamiento de endurecimiento del material. Al presentar el límite elástico del material,  $\sigma_0$  y definir un nuevo parámetro,  $\alpha$ , en relación con  $K$  como  $\alpha = K(\sigma_0/E)^{n-1}$ , es conveniente volver a escribir el término en el extremo derecho de la siguiente manera:

$$K \left( \frac{\sigma}{E} \right)^n = \alpha \frac{\sigma_0}{E} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (2.9)$$



Sustituyendo en la primera expresión, la ecuación de Ramberg-Osgood puede escribirse como:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \frac{\sigma_0}{E} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (2.10)$$

Dónde:  $\varepsilon$  es la deformación,  $\sigma$  es el esfuerzo,  $E$  es el módulo de Young,  $K$  y  $n$  son constantes que dependen del material que está siendo considerado.

En la última forma del modelo de Ramberg-Osgood, el endurecimiento del material depende de las constantes del material  $\alpha$  y  $n$ . Debido a la relación entre el esfuerzo y la deformación en la zona plástica, el modelo de Ramberg-Osgood implica que la deformación plástica está presente incluso en niveles muy bajos de esfuerzo. Sin embargo, para bajos esfuerzos aplicados y con valores de uso común de las constantes del material  $\alpha$  y  $n$ , la deformación plástica sigue siendo insignificante en comparación con la deformación elástica. Por otra parte, para los niveles de esfuerzo más altos que  $\sigma_0$ , la deformación plástica se hace cada vez más grande que la deformación elástica.

El valor de  $\alpha(\sigma_0/E)$ , puede ser visto como el desplazamiento producido, como se muestra en la figura 2.2. Esto viene del hecho de que:

$$\varepsilon = (1 + \alpha) \left( \frac{\sigma_0}{E} \right) \quad (2.11)$$

Cuando  $\sigma = \sigma_0$ .

En consecuencia (ver Figura 2.2):

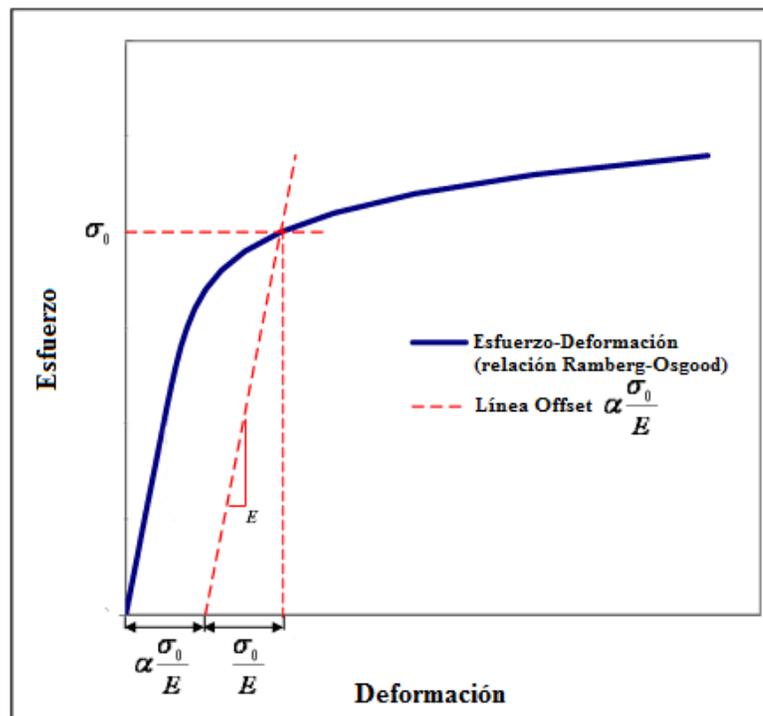
La deformación elástica =  $\sigma_0/E$

Deformación plástica =  $\alpha(\sigma_0/E)$  = límite elástico

Comúnmente se utilizan valores de  $n \approx 5$  o superiores, aunque los valores más precisos se obtienen generalmente mediante el ajuste de la deformación en los datos experimentales. Los valores para  $\alpha$  también se pueden encontrar por medio del ajuste

de los datos experimentales, aunque en algunos materiales puede ser arreglado para tener un de deformación del 0,2%, lo que significa:

$$\alpha \frac{\sigma_0}{E} = 0,002 \quad (2.12)$$



**Figura 2.2.** Representación genérica de la curva esfuerzo-deformación por medio de la ecuación de Ramberg Osgood. Deformación correspondiente a los componentes elásticos y plásticos. Fuente: Ramberg-Osgood (2010)

Rasmussen redefinió la ecuación de Ramberg-Osgood hasta el esfuerzo último para el caso de aceros inoxidables. Estableció dos restricciones para desarrollar su expresión redefinida: la curva esfuerzo-deformación fue aproximada usando la expresión de Ramberg-Osgood para esfuerzos no superiores al esfuerzo de 0,2%, y en



el rango comprendido entre este esfuerzo y el punto último, la curva fue definida en términos de un mínimo de parámetros adicionales.

Rasmussen propone que la curva esfuerzo-deformación desde  $S_{0,2}$  hasta  $S_u$  tiene una forma similar a la parte inicial de la curva hasta  $S_{0,2}$ , lo cual sugiere una transformación lineal del esfuerzo y la deformación, partiendo de la ecuación de Ramberg-Osgood, para lo cual se obtuvo la formulación planteada en la ecuación 2.13:

$$\begin{cases} e = \frac{s}{E_0} + 0,002 \left( \frac{s}{S_{0,2}} \right)^n & \text{Para } S \leq S_{0,2} \\ e = \frac{s-S_{0,2}}{E_{0,2}} + \bar{e}_{up} \left( \frac{s-S_{0,2}}{S_u-S_{0,2}} \right)^m + e_{0,2} & \text{Para } S_{0,2} < S \leq S_u \end{cases} \quad (2.13)$$

En la ecuación (2.12), Rasmussen denomina  $E_{0,2}$  al valor de la tangente a la curva esfuerzo-deformación en el punto de fluencia, y se determina según la ecuación 2.14:

$$E_{0,2} = \frac{1}{E_0 + 0,002 \frac{n}{S_{0,2}}} \quad (2.14)$$

El parámetro  $e_{0,2}$  es la deformación al esfuerzo de fluencia, calculado con la ecuación 2.15:

$$e_{0,2} = \frac{S_{0,2}}{E_0} + 0,002 \quad (2.15)$$

La deformación plástica última transformada  $\bar{e}_{up}$  se obtiene según la ecuación (2.16). Para el caso de aceros inoxidables, los términos  $e_{0,2}$  y  $S_u/E_0$  son despreciables frente a  $e_u$ , por lo que  $\bar{e}_{up} \approx e_u$ .

$$\bar{e}_{up} = e_u - e_{0,2} - \frac{S_u}{E_0} \quad (2.16)$$

El exponente  $m$  fue obtenido por Rasmussen mediante el ajuste de los datos experimentales para el caso de aceros inoxidables y se determina a través de la ecuación:

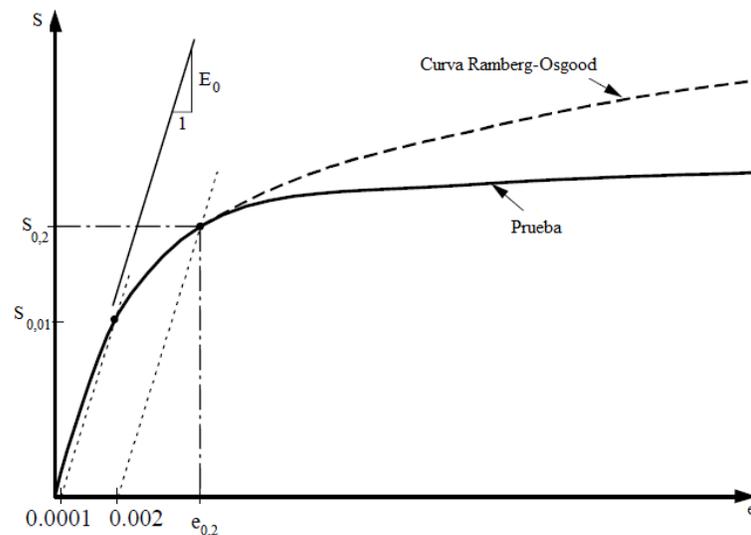
$$m = 1 + 3,5 \frac{S_{0,2}}{S_u} \quad (2.17)$$

Este modelo también fue propuesto independientemente por Mirambell y Real, pero además introducen una corrección, para la Ec. (2.16), la cual según estas observaciones debería determinarse utilizando la siguiente ecuación:

$$\bar{e}_{up} = e_u - e_{0,2} - \frac{S_u - S_{0,2}}{E_{0,2}} \quad (2.18)$$

Posteriormente, Abdella planteó una aproximación a una formulación inversa en dos etapas, basada en el modelo de Ramberg-Osgood para aceros inoxidables, que puede ser utilizada para tracción y compresión.

Las pruebas gráficas obtenidas de la comparación de la ecuación de Ramberg-Osgood y los resultados de Rasmussen se observan en la figura 2.3. Esta diferencia de las curvas es debido a que la ecuación de Rasmussen tiene dos parámetros adicionales.



**Figura 2.3.** Curva típica de esfuerzo-deformación y aproximación de Ramberg-Osgood.

Fuente: Ramberg-Osgood(1943)

Paralelamente Real y Mirambell trabajaron en la misma ecuación, llegando al mismo resultado obtenido por Rasmussen, en donde plantean un nuevo sistema de



Donde “ $S_{0,1}$ ” es el esfuerzo al 1%, “ $n$ ” es el coeficiente de endurecimiento por deformación de la curva que pasa por el punto de prueba del 0,2% y 1%.

A partir de los modelos propuestos por Mirambell-Real y Gardner-Nethercot, Abdella desarrolla una inversión aproximada del esfuerzo “ $S$ ” como una función explícita de la deformación “ $e$ ”, basándose en una ley de potencia. Este plantea estudiar la curva en dos tramos: antes y después del punto de fluencia; por lo que se tiene:

- Caso  $e \leq e_{0,2}$

La función  $f(S,e)$  representa la desviación fraccionaria de la curva esfuerzo-deformación en el comportamiento elástico lineal:

$$f(S, e) = \frac{eE-S}{S} \quad (2.20)$$

El comportamiento de “ $f$ ” en función de “ $e$ ” sugiere que “ $f$ ” puede ser aproximado por una ley de potencia, de la forma:

$$f = ce^p \quad (2.21)$$

Donde se desarrolla la inversión aproximada:

$$S = \frac{Ee}{1+ce^p} \quad (2.22)$$

Con el fin de determinar el parámetro “ $c$ ”, la inversión aproximada dada por la ecuación (2.22), es igualada con la curva esfuerzo-deformación en el valor de deformación  $e_{0,2}$  correspondiente con el esfuerzo del 0,2%, lo cual conduce a:

$$c = \frac{r-1}{e_{0,2}^p} \quad (2.23)$$

Donde  $r = \frac{E \cdot e_{0,2}}{S_{0,2}}$



De forma similar “p” es obtenido por la igualación de la pendiente de la inversión aproximada con la pendiente  $E_2$  de la curva esfuerzo-deformación en  $e=e_{0,2}$ , el cual conduce a:

$$p = r \left( \frac{1-r_2}{r-1} \right) \quad (2.24)$$

$$\text{Donde } r_2 = \frac{E_2 \cdot e_{0,2}}{S_{0,2}}$$

Por tanto, para  $e \leq e_{0,2}$ , la inversión aproximada puede escribirse en una forma normalizada:

$$S_n = \frac{r \cdot e_n}{1+(r-1)e_n^p} \quad (2.25)$$

Donde el esfuerzo y la deformación normalizada están dados por:

$$(e_n, S_n) = \left( \frac{e}{e_{0,2}}, \frac{S}{S_{0,2}} \right)$$

- Caso  $e > e_{0,2}$

Recordando que en un nuevo sistema de referencia con origen en el punto  $(e_{0,2}; S_{0,2})$ , la curva esfuerzo-deformación para valores de deformación mayores al 0,2% tiene un comportamiento similar a las deformaciones menores al punto mencionado, por tanto se asume una inversión aproximada que se puede observar en la ecuación 2.26:

$$\frac{e^* E^* - S^*}{S^*} = c^* e^{*p^*} \quad (2.26)$$

$$\text{Donde } c^* = \frac{r^*-1}{(e-e_{0,2})^{p^*}} \text{ y } r^* = \frac{E_2(e_u - e_{0,2})}{S_u - S_{0,2}}$$

La pendiente  $E_u$  en todo el rango de la curva está dada por:

$$E_u = \frac{E_2}{1+(r^*-1)m} \quad (2.27)$$

Por lo tanto, la igualación de las pendientes en  $e=e_u$  con  $E_u$  viene dado por  $p^*$ :

$$p^* = r^* \left( \frac{1-r_u}{r^*-1} \right) \quad (2.28)$$

$$\text{Donde } r_u = \frac{E_u(e_u - e_{0,2})}{S_u - S_{0,2}}$$

De forma normalizada se tiene:

$$S_n = 1 + \frac{r_2(e_n - 1)}{1 + \frac{(r^*-1)(e_n - 1)}{(e_{nu} - 1)^{p^*}}} \quad (2.29)$$

$$\text{Donde } e_{nu} = \frac{e_u}{e_{0,2}}$$

Por lo que en términos de esfuerzo y deformación normalizados se tiene la ecuación 2.30:

$$\begin{cases} S_n = \frac{r \cdot e_n}{1 + (r-1)e_n^p} & \text{Para } S \leq S_{0,2} \\ S_n = 1 + \frac{r_2(S_n - 1)}{1 + \frac{(r^*-1)(S_n - 1)}{(e_{nu} - 1)^{p^*}}} & \text{Para } S > S_{0,2} \end{cases} \quad (2.30)$$

Abdella demostró que la formulación explícita es una excelente solución numérica iterada de la ecuación no lineal para definir el rango completo de la curva esfuerzo-deformación.

## 2.4 AJUSTES.

El método de mínimos cuadrados son diversos pasos entrelazados utilizados para aproximar un conjunto de puntos a un modelo, el cual puede ser lineal, cuadrático o exponencial. Se basa en el principio de reducir la varianza a mínimo, adecuándolo a uno de los modelos anteriormente citados. Además nos brinda información importante sobre la tendencia que tendrá alguna variable en cuestión. (Mata *et al*, 2004).



### 2.4.1 Ajuste por mínimos cuadrados lineal

El método de mínimos cuadrados lineal es el procedimiento más objetivo para ajustar una recta a un conjunto de datos presentados en un diagrama de dispersión. La recta resultante presenta dos características importantes:

1. Es nula la suma de las desviaciones verticales de los puntos a partir de la recta de ajuste

$$\sum (Y_o - Y) = 0$$

2. Es mínima la suma de los cuadrados de dichas desviaciones. Ninguna otra recta daría una suma menor de las desviaciones elevadas al cuadrado

$$\sum (Y_o - Y)^2 \rightarrow 0$$

El procedimiento consiste entonces en minimizar las sumatorias de los cuadrados de los residuos.

$\sum C_i^2 = \sum (Y^o - \hat{Y})^2$  Reemplazando  $\hat{Y}$  queda expresado de la siguiente manera:

$$\sum C_i^2 = \sum [Y_o - (a + bx)]^2$$

La obtención de los valores de a y b que minimizan esta función es un problema que se puede resolver recurriendo a la derivación parcial de la función en términos de a y b: llamemos G a la función que se va a minimizar:

$$G = \sum (Y - a - bx)^2$$

Se toman las derivaciones parciales de G respecto de a y b que son las incógnitas y las igualamos a cero; de esta forma se obtienen dos ecuaciones normales del modelo que pueden ser resueltas por cualquier método para obtener los valores de a y b.

$$G = \sum (Y - a - bx)^2$$

Derivando parcialmente la ecuación respecto de a

$$\frac{\partial G}{\partial a} = 2 \sum (y - a - bx) (-1) = 0$$

$$\frac{\partial G}{\partial a} = -2 \sum (y - a - bx) = 0$$

$$\frac{\partial G}{\partial a} = \sum (y - a - bx) = 0$$

$$\frac{\partial G}{\partial a} = \sum y - na - b \sum x = 0$$

$$\sum y = na + b \sum x \quad \text{Primera ecuación normal} \quad (2.31)$$

Derivando parcialmente la ecuación respecto de b

$$\frac{\partial G}{\partial b} = 2 \sum (y - a - bx) (-x) = 0$$

$$\frac{\partial G}{\partial b} = -2 \sum (y - a - bx)(x) = 0$$

$$\frac{\partial G}{\partial b} = \sum (y - a - bx) (x) = 0$$

$$\frac{\partial G}{\partial b} = \sum (xy - ax - bx^2) = 0$$

$$\frac{\partial G}{\partial b} = \sum xy - a \sum x - b \sum x^2 = 0$$

$$\sum xy = a \sum x + b \sum x^2 \quad \text{Segunda ecuación normal} \quad (2.32)$$

Los valores de a y b se obtienen resolviendo el sistema de ecuaciones resultante.



### 2.4.2 Ajuste por mínimos cuadrados no lineal.

Se entiende por un modelo de regresión no lineal aquel para el cual sus primeras derivadas con respecto a los parámetros son funciones no lineales de estos.

A continuación se muestra la realización y aplicación del método de los mínimos cuadrados no lineal utilizado en el algoritmo de Ciaccia *et al* 2006, para la obtención del parámetro “m” de la ecuación de Mirambell-Real.

Partiendo de la ecuación general de ajuste de mínimos cuadrados no lineales:

$$\frac{\partial S}{\partial c_k} = \frac{\partial}{\partial c_k} \sum_{i=1}^P (y_i - F(\bar{c}, x_i))^2 = 0 \quad (2.33)$$

Donde  $F(\bar{c}, x_i)$  es la función de ajuste,  $\bar{c}$  es el vector de coeficiente de ajuste  $[c_1, c_2, \dots, c_q]$ , q es el numero de coeficientes de ajuste, y P es el número de pares de datos  $(x_i, y_i)$ , se realiza una particularización para la parte de la ecuación de Mirambell-Real que define el comportamiento de la zona plástica, es decir:

$$e = \frac{S - S_{0,2}}{E_{0,2}} + e_u \left( \frac{S - S_{0,2}}{S_u - S_{0,2}} \right)^m + e_{0,2} \rightarrow S > S_{0,2} \quad (2.34)$$

Se efectúan cambios de variables para facilitar la manipulación:

$$x = \left( \frac{S - S_{0,2}}{S_u - S_{0,2}} \right) \rightarrow S - S_{0,2} = (S_u - S_{0,2})x \rightarrow y = e$$

Quedando la ecuación 2.33 como:

$$y = e_{up} X^m + \frac{(S_u - S_{0,2})X}{E_{0,2}} + e_{0,2} \quad (2.35)$$

Simplificando aun más:

$$a_1 = e_{up}; \quad a_2 = \frac{S_u - S_{0,2}}{E_{0,2}}; \quad a_3 = e_{0,2}$$

La ecuación 2.35 se puede expresar como:

$$y = a_1 X^m + a_2 X + a_3 \quad (2.36)$$

Tomando la ecuación 2.36 como ecuación de ajuste, se puede inferir que el único parámetro de ajuste es  $c_k = c_1 = m$ . sustituyendo la ecuación 2.36 en la ecuación 2.33 se obtiene:

$$\frac{\partial S}{\partial m} = \frac{\partial}{\partial m} \sum_{i=1}^P (y_i - (a_1 X_i^m + a_2 X_i + a_3))^2 = 0$$

$$\sum_{i=1}^P [2(y_i - (a_1 X_i^m + a_2 X_i + a_3))(-a_1 m X_i^{m-1})] = 0 \quad (2.37)$$

En la ecuación 2.36 se puede extraer de la suma el factor común  $-2a_3$ , y simplificando se obtiene:

$$\sum_{i=1}^P (y_i - (a_1 X_i^m + a_2 X_i + a_3))(m X_i^{m-1}) = 0 \quad (2.38)$$

Luego se obtiene un juego de valores (S,e) para los cuales se realiza el ajuste de la ecuación 2.34, previo cálculo de los parámetros  $S_{0,2}$ ,  $e_{0,2}$ ,  $S_u$  y  $e_u$ , resolviendo con métodos numéricos la ecuación 2.38 para obtener el valor m.

## 2.5 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN.

Describe la intensidad de la relación entre dos conjuntos de variables de nivel de intervalo. Es la medida de intensidad de la relación lineal entre dos variables.



El valor del coeficiente de correlación puede tomar valores desde cero hasta uno, indicando que mientras más cercano a uno sea el valor del coeficiente de correlación, en cualquier dirección, mas fuerte será la asociación lineal entre las dos variables. Mientras más cercano a cero sea indicará que más débil es la asociación entre ambas variables y si es igual a cero se concluirá que no existe relación lineal alguna entre ambas variables. La clasificación del coeficiente de correlación se muestra en la tabla 2.1

Tabla 2.1. Clasificación según grado de coeficiente de correlación.

Coef. de correlación $R^2$ (%)	Clasificación del coeficiente de correlación $R^2$
0,0 - 0,2	Correlación muy débil, despreciable.
0,2 - 0,4	Correlación débil, bajo.
0,4 - 0,7	Correlación moderada.
0,7 - 0,9	Correlación fuerte, importante.
0,9 - 1,0	Correlación muy fuerte, muy alta.

Fuente: Mata *et al*, 2004

La correlación entre los valores de las dos variables es un hecho, el que se considere satisfactorio o no, depende de la interpretación. Otro problema que representa la correlación es cuando se pregunta si una variable, de algún modo causa o determina a la otra. La correlación no implica causalidad. Si las variables X y Y están correlacionadas, puede ser porque X causa a Y, o porque Y causa a X, o porque alguna otra variable afecta tanto a X como a Y, o por la combinación de todas estas razones. (Mata *et al*, 2004).

$$R^2 = \frac{1/n * \sum(x_i - x_m) * (y_i - y_m)}{((1/n * \sum(x_i - x_m)^2) * (1/n * \sum(y_i - y_m)^2))^{1/2}} \quad (2.39)$$

Es decir, el numerador se denomina covarianza y se calcula de la siguiente manera: en cada par de valores (x, y) se multiplica la “x” menos su media, por la “y” menos su media. Se suma el resultado obtenido de todos los pares de valores y este número se divide por el tamaño de la muestra. En el denominador se calcula el producto de las varianzas de “x” y de “y”, y a este producto se le calcula la raíz cuadrada.

## 2.6 CORRECCIÓN POR BRIDGMAN EN EL ENSAYO DE TRACCIÓN.

De este ensayo se obtienen pares de valores carga y desplazamiento del cabezal. Inicialmente debe hacerse la corrección de estos resultados por efecto de la deformación elástica de los cabezales de la máquina que sujetan a la muestra en sus extremos. Sean  $F_i$  y  $\Delta l_i$  los valores de fuerza aplicada y desplazamiento del cabezal respectivamente, obtenidos a lo largo del ensayo de tracción (hasta la rotura), el alargamiento corregido de la muestra puede determinarse como:

$$\Delta l_{\text{corregido}} = \Delta l_i - F_i \left( \frac{K_{\text{muestra}} - K_{\text{total}}}{K_{\text{muestra}} \cdot K_{\text{total}}} \right) \quad (2.40)$$

Siendo  $K_{\text{muestra}}$  el parámetro de rigidez de la muestra y  $K_{\text{total}}$  el parámetro de rigidez del conjunto muestra-máquina. El parámetro de rigidez de la muestra se puede determinar a partir de sus dimensiones iniciales, área  $A_0$  y longitud  $L_0$  y el módulo elástico del material E, así:

$$K_{\text{muestra}} = \left( \frac{A_0 E}{L_0} \right) \quad (2.41)$$

El parámetro de rigidez compuesto muestra-máquina puede determinarse por el método de mínimos cuadrados, haciendo uso de los valores experimentales obtenidos durante el ensayo de tracción y comprendidos únicamente en el intervalo correspondiente a la deformación elástica, a partir de la siguiente expresión:

$$K_{\text{total}} = \frac{\sum F_i \Delta L_i}{\sum \Delta L_i^2} \quad (2.42)$$



Una vez determinados los parámetros de rigidez, se procede a la corrección de los datos, empleando para ello la ecuación (2.40)

El esfuerzo nominal o de ingeniería será:

$$S = \frac{F_i}{A_0} \quad (2.43)$$

La deformación nominal o de ingeniería:

$$e = \frac{\Delta l_{\text{corregido}}}{L_0} \quad (2.44)$$

El esfuerzo verdadero:

$$\sigma = S(1 + e) \quad (2.45)$$

Y la deformación verdadera:

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (2.46)$$

Las ecuaciones precedentes (2.43 a 2.46), sólo son válidas hasta la carga máxima, porque es hasta allí donde se cumple la conservación de volumen. Por tanto, para determinar los valores de esfuerzo y deformación desde el inicio de estricción hasta la fractura, se puede recurrir a la corrección de Bridgman, aplicable sólo a muestras de sección transversal circular.

La corrección de Bridgman consiste en determinar los valores de  $\sigma$  y  $\varepsilon$  reales en el momento de la fractura, como si no ocurriera formación del cuello. Una vez determinado el punto de coordenadas: deformación a la fractura y esfuerzo a la

fractura, se puede extender una curva suavizada desde el punto de coordenadas: deformación a carga máxima y esfuerzo a carga máxima, con aquél determinado a partir de la corrección de Bridgman, obteniendo finalmente una curva esfuerzo verdadero-deformación verdadera extendida ( $\sigma$  vs.  $\epsilon$ ), que de acuerdo al criterio de Von Mises se corresponde con una curva esfuerzo efectivo-deformación efectiva ( $\sigma$  vs.  $\epsilon$ ).

Para hacer la corrección por efectos de la estricción localizada en muestras de sección circular haciendo uso de la corrección de Bridgman, debe determinarse:

La deformación verdadera a la fractura:

$$\epsilon_f = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) \quad (2.47)$$

Siendo  $A_0$  y  $A_f$  las áreas de la sección transversal de la muestra al inicio y en la fractura respectivamente.

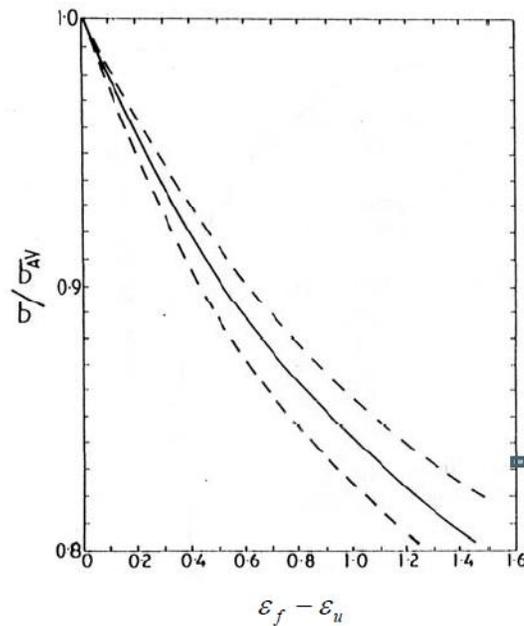
La deformación verdadera a máxima carga:

$$\epsilon_u = \ln(1 + e_u) \quad (2.48)$$

Con la diferencia  $\epsilon_f - \epsilon_u$ , se ingresa a la curva maestra de corrección mostrada en la figura 2.5, para obtener la relación entre el esfuerzo corregido a la fractura  $\sigma$  y el esfuerzo promedio  $\sigma_{av}$ .

El esfuerzo promedio se obtiene como sigue:

$$\sigma_{av} = \frac{F_{fractura}}{A_{fractura}} \quad (2.49)$$

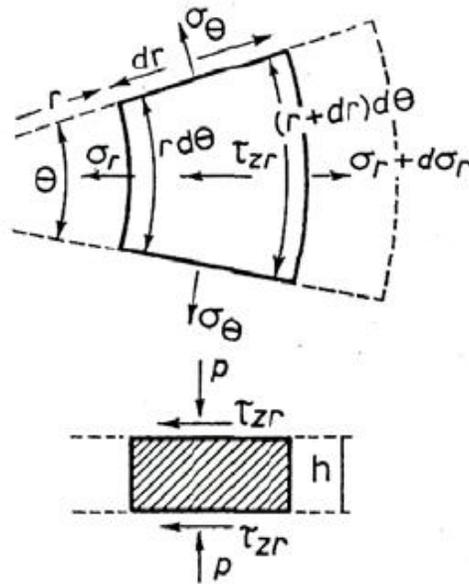


**Figura 2.5.** Curva maestra para la determinación del esfuerzo a la fractura corregido por efecto de la estricción localizada mediante la corrección de Bridgman. Fuente: Cabello *et al* (2006).

## 2.7 CORRECCIÓN POR FRICCIÓN PARA EL ENSAYO DE COMPRESIÓN CILÍNDRICA.

Debido al estado de esfuerzos aplicado, la falla de la probeta, a diferencia de las de tracción, ocurre por abarrilamiento de la muestra como consecuencia de la fricción que presenta en las superficies en contacto con los platos compresores. Otro efecto que usualmente se presenta es el pandeo, el cual se puede corregir seleccionando una adecuada relación de esbeltez ( $h_0/d_0$ ); las cuales se encuentran especificadas en las normas que rigen este tipo de ensayos.

El estado de esfuerzos presente en el ensayo de compresión cilíndrica se muestra en la figura 2.6.



**Figura 2.6.** Estado de esfuerzos presente en el ensayo de compresión cilíndrica. Fuente: Cabello *et al* (2006).

Del equilibrio radial, resulta:

$$(\sigma_r - d\sigma_r)h(r + dr)d\theta - \sigma_r h r d\theta - 2\sigma_\theta h dr \sin \frac{d\theta}{2} - 2\tau_{zr} r d\theta dr = 0 \quad (2.50)$$

Por otra parte, y como se trata de un estado de esfuerzos cilíndricos, se tiene que:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = Y = \sigma_r - (-p) \quad (2.51)$$

Combinando las ecuaciones (2.50) y (2.51) resulta:

$$-dph - 2\mu p dr = 0 \quad (2.52)$$

Y al integrar se obtiene:

$$\frac{p}{Y} = e^{2\mu \frac{(\frac{D}{2} - r)}{h}} \quad (2.53)$$



Donde  $D$  y  $h$  corresponden al diámetro y altura del cilindro respectivamente, al final de la compresión;  $Y$  es el esfuerzo de fluencia en condiciones de tensión uniaxial.

Como para efectos del ensayo de compresión resulta más útil la expresión de presión media, se puede escribir entonces:

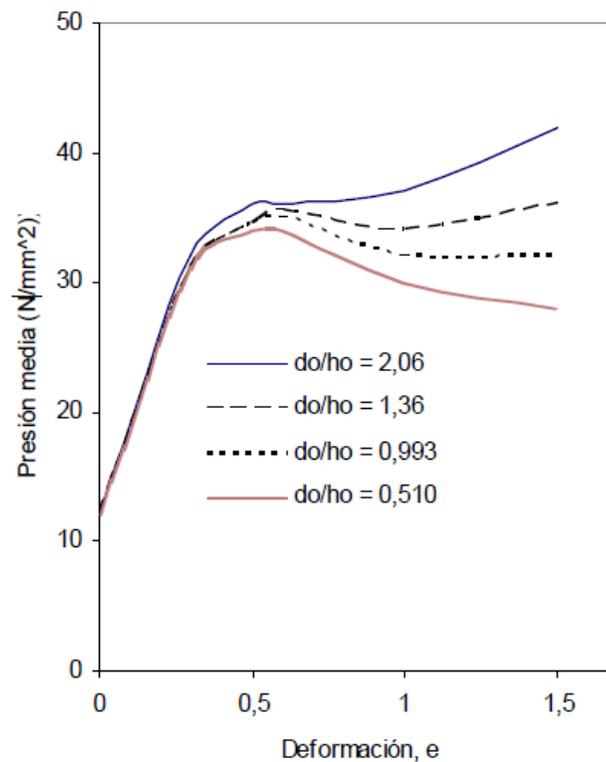
$$\bar{p} = \frac{\int_0^{D/2} 2\pi r p dr}{\pi(D/2)^2} = \frac{Y}{2} \left(\frac{2h}{\mu D}\right)^2 \left[ \exp\left(\frac{\mu D}{h}\right) - \frac{\mu D}{h} - 1 \right] \quad (2.54)$$

La expresión (2.53) puede simplificarse si se considera que la lubricación es la adecuada como para generar pequeños valores de  $\mu$  (para ello se sustituye en la expresión términos en serie), resultando:

$$\bar{p} = Y + \frac{\mu Y}{3} \left(\frac{1}{1+e}\right)^{3/2} \frac{d_0}{h_0} \quad (2.55)$$

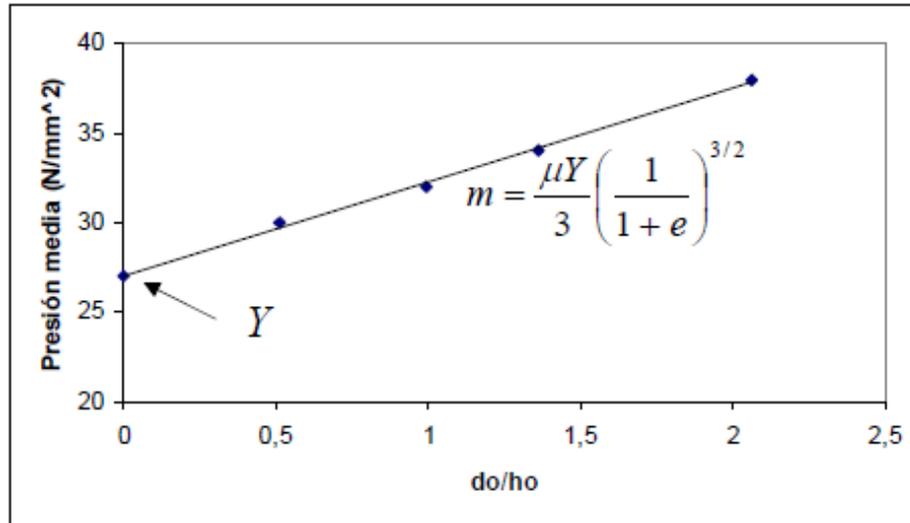
De la ecuación (2.55) puede notarse que empleando diferentes relaciones de esbeltez  $d_0/h_0$  y comprimiendo hasta alcanzar una deformación constante  $e$ , se obtienen diferentes valores de presión media (experimentales), que al graficarlos en coordenadas presión media versus relación de esbeltez, resultará una recta, cuyo corte con el eje de presión media será “ $Y$ ”, y la pendiente de dicha recta puede asociarse con el coeficiente de fricción  $\mu$ .

En la figura 2.7, se muestran cuatro ensayos de compresión correspondientes a diferentes relaciones de esbeltez. Si se toma constante una deformación como por ejemplo la unidad, cada ensayo estará asociado a un valor diferente de presión media.



**Figura 2.7.** Ensayos de compresión a diferentes relaciones de esbeltez para la determinación del coeficiente de fricción. Fuente: Cabello *et al* (2006).

Los valores de presión media correspondientes a los cuatro ensayos de compresión mostrados en la figura 2.7, junto con un valor de deformación igual a la unidad; se representan en la figura 2.8, incluyendo además la línea de tendencia extendida hasta el eje de la presión media, cuya intersección corresponde con “Y” y la pendiente está relacionada con el coeficiente de fricción  $\mu$  tal como se muestra en la figura 2.8.



**Figura 2.8.** Determinación del coeficiente de fricción en un ensayo de compresión cilíndrica, asociado a la pendiente de la recta  $p$  vs.  $d_0/h_0$  para una deformación constante e igual a la unidad. Fuente: Cabello *et al* (2006).



## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

Para resolver la situación planteada, la cual consiste en ajustar parámetros de las ecuaciones propuestas por Mirambell-Real y la aproximación explícita de Abdella para evaluar el comportamiento elastoplástico de aleaciones de aluminio, se desarrolló un trabajo de investigación de tipo documental y experimental, el cual se describe en las secciones siguientes.

#### 3.1 MATERIALES

##### 3.1.1 Características y preparación del material.

Para la elaboración de las muestras fue necesario realizar previamente un tratamiento térmico de envejecimiento a 300°C durante 1 hora a la mitad de las probetas a ensayar; para la selección de estos parámetros se tomó como referencia el trabajo realizado por (Saenz *et al*, 2006), con la finalidad de cambiar las condiciones de estudio y obtener variedad en los resultados de los ensayos.

##### *Composición química de la aleación estudiada*

Para conocer los componentes químicos de la aleación a estudiar fue necesario estipular el porcentaje en que se encuentran presentes los elementos aleantes, dicho estudio fue realizado en la empresa ALUCASA, y los resultados se muestran en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Composición química de la aleación de aluminio 6063

	Si(%)	Fe(%)	Cu(%)	Mn(%)	Mg(%)	Zn(%)	Cr(%)	Ti(%)	Ga(%)	Al(%)
Min.	0,385	0,166	0,001	0,0013	0,4522	0,0013	0,0017	0,010	0,008	98,96

### 3.1.2. Condiciones de ensayo

Para conocer el comportamiento elastoplástico del AA-6063, se realizaron estudios del material bajo ocho condiciones distintas, las cuales se muestran en la tabla 3.2.

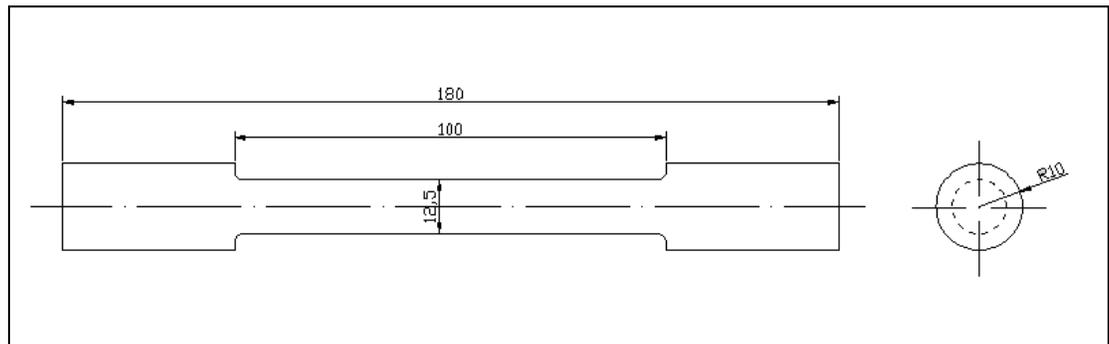
**Tabla 3.2.** Condiciones de ensayos de las probetas

Condición de ensayo	Nro. de ensayos
Tracción original	5
Tracción envejecido	5
Compresión corte transversal original	5
Compresión corte transversal envejecido	5
Compresión corte longitudinal original	5
Compresión corte longitudinal envejecido	5
Torsión original	5
Torsión envejecido	5

### 3.1.3 Preparación de probetas según normas.

#### *Ensayo de tracción*

Para los ensayos de tracción, las probetas se realizaron según la norma ASTM E-8M. Se utilizaron probetas cilíndricas de 180 mm de longitud mostrada en la figura 3.1

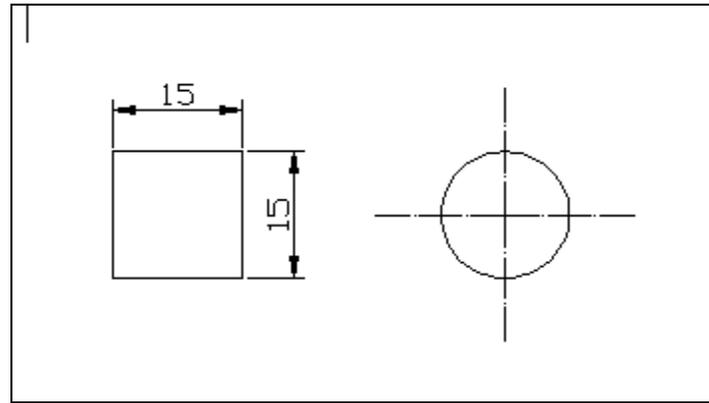


**Figura 3.1.** Probeta cilíndrica según norma ASTM E-8M

#### *Ensayo de compresión axial*

Se realizaron ensayos previos a los ensayos de compresión axial, para la obtención del coeficiente de fricción en el mismo. Para esto se utilizaron probetas con cinco (5) relaciones de esbeltez distintas. Las mismas fueron seleccionadas variando la altura de la probeta utilizada para el ensayo de compresión y son: 0,967; 0,882; 0,811; 0,75; 0,697.

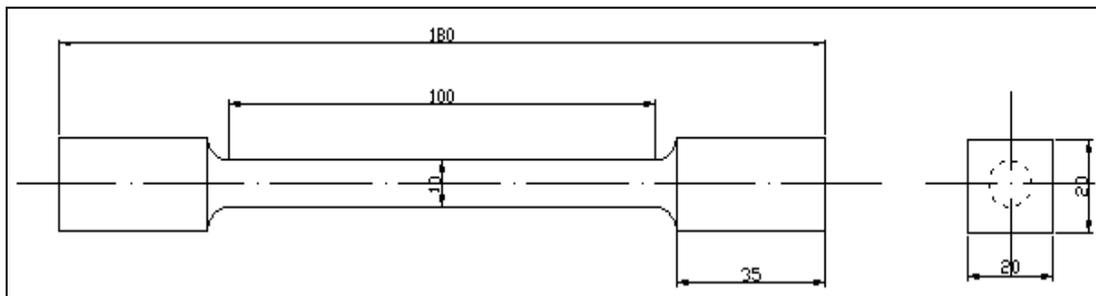
Para los ensayos de compresión, las probetas se realizaron según la norma ASTM E9-89. Se utilizaron probetas cilíndricas para especímenes cortos de 15 mm de longitud y 15 mm de diámetro. La geometría de la probeta se muestra en la figura 3.2.



**Figura 3.2.** Probeta cilíndrica según norma ASTM E9-89

### *Ensayo de torsión*

Para los ensayos de torsión, las probetas se realizaron a partir de barras cilíndricas de 31.75 mm de diámetro, siguiendo la norma COVENIN 907-1997 para la escogencia del diámetro y el largo de la probeta, los extremos de esta serán condicionados en su forma y longitud a la forma de las mordazas de la máquina. La geometría de la probeta se muestra en la figura 3.3

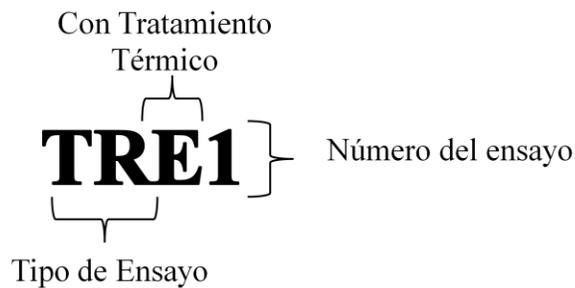


**Figura 3.3.** Probeta para torsión según norma COVENIN 907-1997

### 3.2 NOMENCLATURA DE LAS PROBETAS.

A continuación en la figura 3.4 se describe la nomenclatura utilizada para las probetas.

- TR: ensayo de tracción.
- T: ensayo de torsión.
- LC: ensayo de compresión de probetas cortadas longitudinalmente.
- E: tratamiento termico de envejecimiento.



**Figura 3.4.** Nomenclatura de las probetas.

### 3.3 ENSAYOS MECÁNICOS

#### 3.3.1 Ensayo de tracción

Este ensayo se realizó para obtener la curva carga-alargamiento. Se utilizó un equipo universal de ensayos de materiales con capacidad hasta 100 toneladas, ubicada en la empresa CINCATESA la Victoria, donde se usaron probetas de tracción con la geometría mostrada en la figura 3.1 y se realizaron cinco (5) ensayos para cada condición de estudio, para un total de diez (10) ensayos.



### **3.3.2 Ensayo de compresión axial**

Para este ensayo se utilizó un equipo universal de ensayos de materiales con capacidad hasta 20 toneladas, marca GALDABINI, ubicado en la Universidad de Carabobo, utilizando probetas cuya geometría se muestra en la figura 3.2. Para el ensayo de compresión axial se realizaron quince (15) ensayos previos con la finalidad de determinar el coeficiente de fricción en la aleación de aluminio 6063 lubricada con Bisulfuro de Molibdeno; después se realizaron cinco (5) ensayos para cada condición de estudio, siendo un total de veinte (20) ensayos debido a que las probetas fueron cortadas tanto de forma transversal como longitudinal.

### **3.3.3 Ensayo de torsión**

Para este ensayo se utilizó el banco de torsión experimental del laboratorio de Materiales de la Universidad de Carabobo, con muestra según la geometría de la figura 3.3.

Para cada condición de estudio se realizaron cinco (5) ensayos, para una totalidad de diez (10), en estos se hizo que la probeta rompiera mediante la aplicación de un esfuerzo de corte por un periodo de tiempo relativamente corto.

## **3.4 AJUSTES DE PARÁMETROS DE ECUACIONES CONSTITUTIVAS UNIAXIALES.**

Luego de realizados los ensayos se hicieron los cálculos de los parámetros descritos en la ecuación de Mirambell-Real y la aproximación explícita de Abdella para la descripción del comportamiento elastoplástico de la aleación de aluminio 6063.

Los parámetros de la ecuación de Mirambell-Real se obtuvieron mediante la curva experimental esfuerzo-deformación ingenieril donde:

- “ $E_0$ ” modulo de Elasticidad, representa la pendiente de la zona elástica en la curva. (Figura 3.5).
- “ $n$ ” exponente de Ramberg-Osgood para determinar la zona no lineal de la curva, definido por la ecuación 2.7.
- “ $E_{0,2}$ ” valor de la tangente de la curva esfuerzo-deformación en el punto de fluencia al 0,2%. (Ecuación 2.14).
- “ $S_{0,2}$ ” y “ $S_{0,01}$ ” son parámetros independientes, determinados según el método “offset” a la deformación de 0,01% y 0,2% respectivamente. (Figura 3.6).
- “ $e_{0,2}$ ” deformación al esfuerzo de fluencia “ $S_{0,2}$ ”. (Ecuación 2.15).
- “ $S_u$ ” representa el esfuerzo máximo de la curva y “ $e_u$ ” es la deformación para el esfuerzo máximo “ $S_u$ ”.

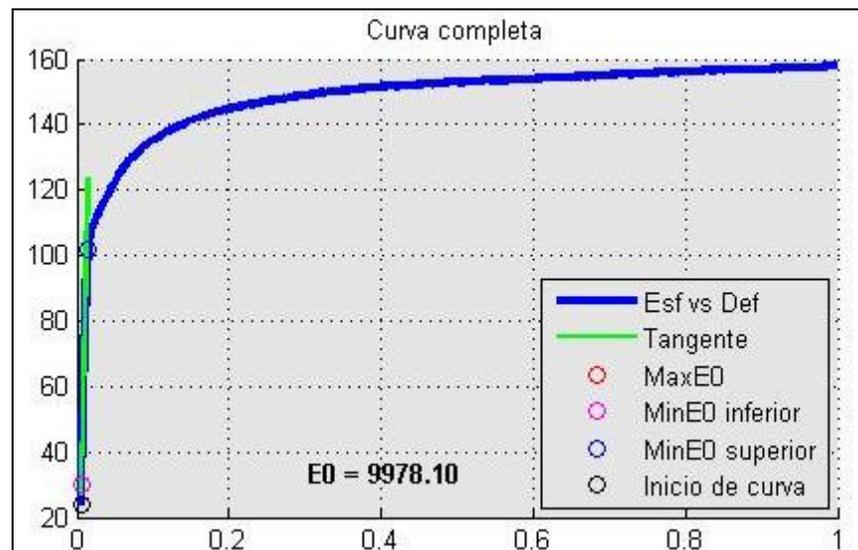
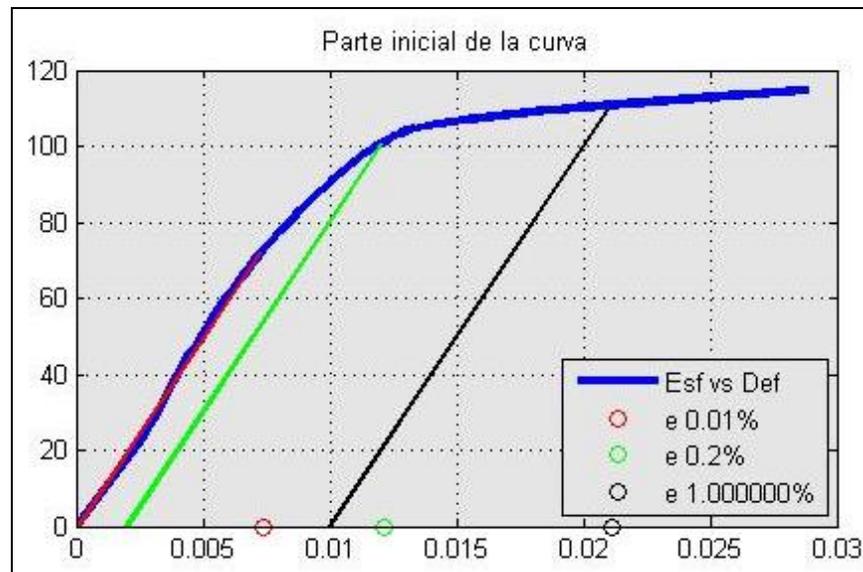


Figura 3.5. Pendiente de zona elástica “ $E_0$ ”.



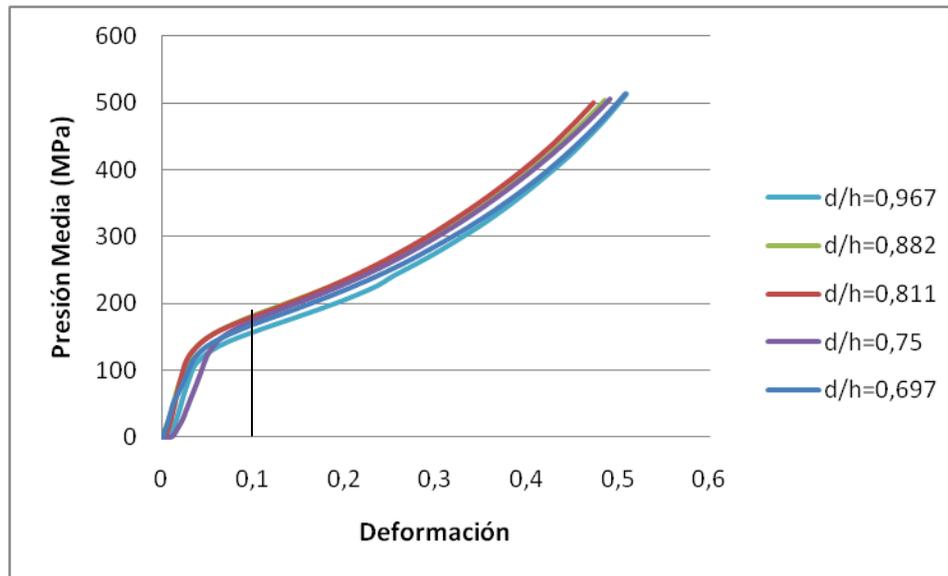
**Figura 3.6.** Método “offset” aplicado a la curva esfuerzo-deformación.

Luego de obtener estos valores se procedió a calcular el parámetro “m”. Este es el exponente que define la forma de codo en la ecuación de Mirambell-Real. Puede hallarse de distintas maneras como en el caso de Rasmussen (2003) el cual uso el método de ensayo y error para obtener un valor de exponente que se ajustara a la curva. En esta investigación se halló dicho exponente aplicando un ajuste por el método de los mínimos cuadrados no lineal, mediante un software de uso comercial utilizando el algoritmo aplicado por Aparicio (2010), el cual se describe en la sección 2.4.2, y seguidamente la aplicación del método de los mínimos cuadrados lineal, donde se graficaron los valores del exponente “m” vs la relación entre el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo ultimo, cuya pendiente proporciona una expresión que describe el exponente “m” de Mirambell-Real para la aleación de aluminio 6063 en las condiciones de ensayo planteadas.

Los modelos de Mirambell-Real y Abdella fueron aplicados para la curva esfuerzo-deformación ingenieril y luego llevados a curva esfuerzo-deformación efectiva mediante las ecuaciones 2.46 y 2.47.

### 3.5 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN.

Para el cálculo del coeficiente de fricción en los ensayos de compresión, lubricados con bisulfuro de molibdeno, se realizaron un total de quince (15) ensayos con cinco (5) relaciones de esbeltez distintas. Siguiendo la metodología de Cabello y torres (2006) se estableció una deformación constante de  $e = 0,1$  mm/mm, con un valor de presión media asociado para cada relación de esbeltez, como se muestra en la figura 3.7.



**Figura 3.7.** Valor de deformación constante establecido para el cálculo del coeficiente de fricción.

Luego se trazó una línea de tendencia cuya pendiente según la ecuación 2.55, depende del coeficiente de fricción  $\mu$ . Como se muestra en el ejemplo de la figura 2.8.

### 3.6 CÁLCULO DE LA CORRECCIÓN DE BRIDGMAN.

Para el cálculo de la corrección de Bridgman se necesitó conseguir el esfuerzo verdadero a la fractura, la deformación verdadera a máxima carga y el esfuerzo



promedio; para ello se buscó el punto de máxima carga y el de ruptura de cada curva para satisfacer las ecuaciones 2.47, 2.48 y 2.49.

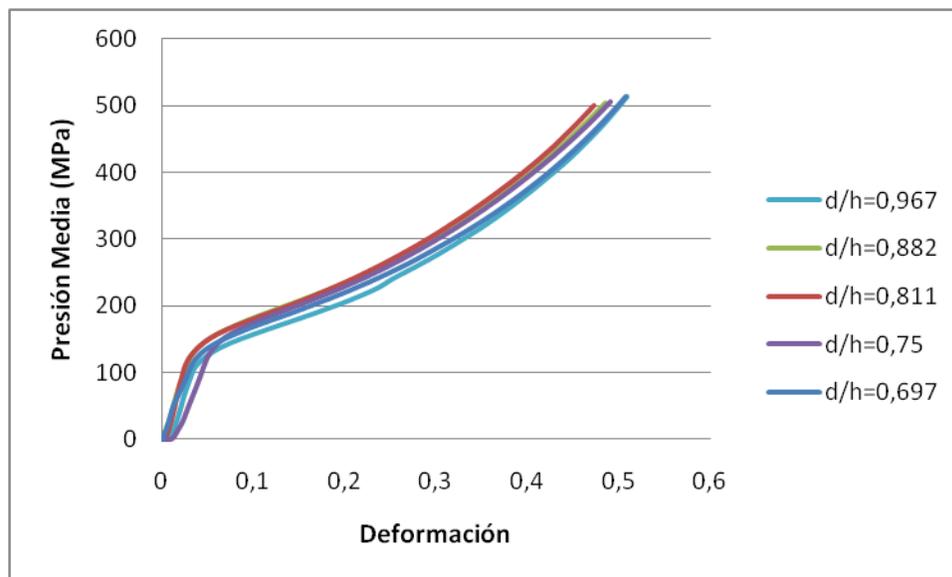
Una vez conseguido los valores correspondientes a dichas ecuaciones, se determinó el esfuerzo a la fractura corregido por efecto de la estricción localizada, con los valores esfuerzo promedio y diferencia de deformaciones mediante la curva maestra de la figura 2.5.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN.

Para calcular el coeficiente de fricción existente entre los platos compresores y el material durante el ensayo a compresión usando bisulfuro de molibdeno como lubricante, se siguió el procedimiento de la sección 3.5, obteniéndose los resultados de la figura 4.1.

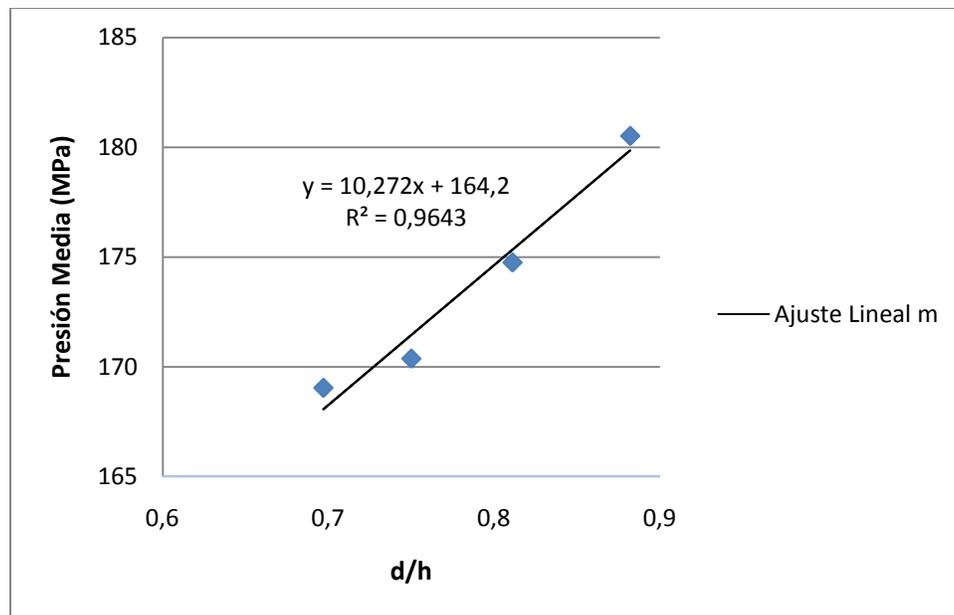


**Figura 4.1.** Gráfico presión media vs deformación ingenieril para distintas relaciones de esbeltez, utilizando bisulfuro de molibdeno.

El valor de deformación fijado fue  $e = 0,1$  mm/mm cuyo valor de presión media para cada relación de esbeltez se muestra en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1.** Valores de presión media para cada relación de esbeltez con  $e = 0,1$

<b>Relación de esbeltez (d/h)</b>	0,967	0,882	0,811	0,75	0,697
<b>Presión media (P)</b>	168,54	180,51	174,75	170,37	169,04



**Figura 4.2.** Gráfico presión media vs relación de esbeltez.

Se graficaron cuatro puntos debido a que el valor de presión media para la relación de esbeltez 0,967 se encuentra fuera de la tendencia que denotan los demás puntos, lo que originaba que se obtuviera un coeficiente de correlación de 61%. Esto



puede deberse a diferentes factores, entre los cuales podría citarse una aplicación de la película de lubricante distinta a la de los otros ensayos.

A partir de la metodología establecida por Cabello y Torres (2006), ecuación 2.55, se obtuvo que el coeficiente de roce para el bisulfuro de molibdeno es  $\mu = 0,216$  según el cálculo 4.1.

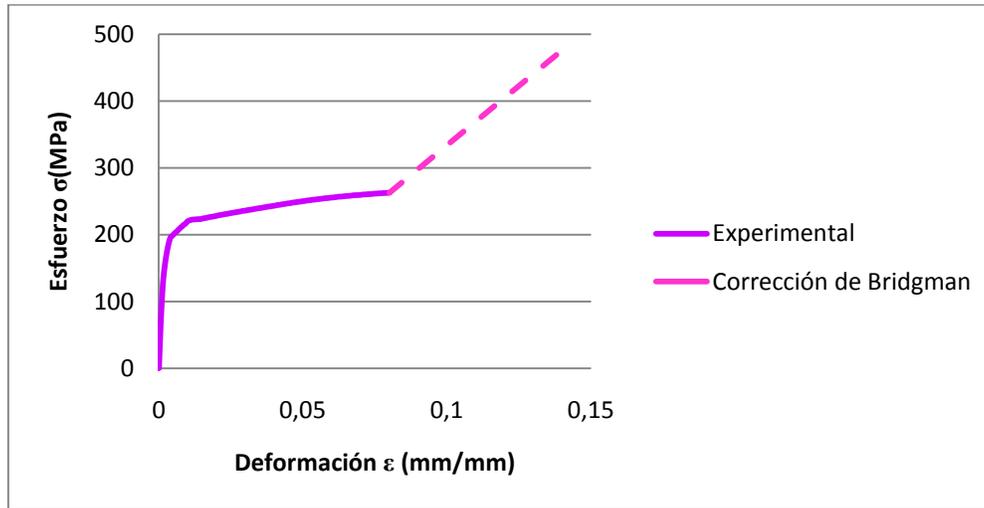
$$\mu = \frac{3 * 10,272}{164,2 \left( \frac{1}{1 + 0,1} \right)^{3/2}} = 0,216 \quad (4.1)$$

#### 4.2 CORRECCIÓN DE BRIDGMAN.

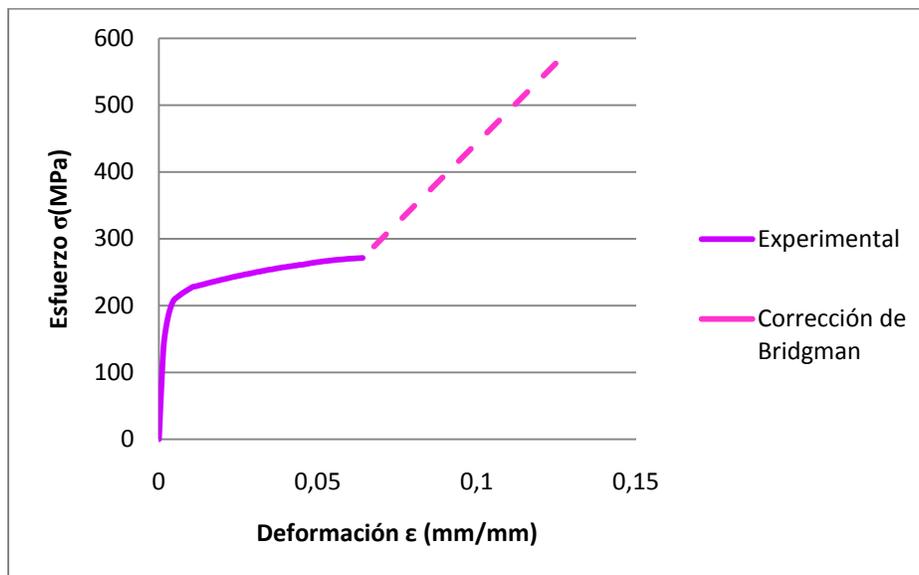
Para realizar los cálculos de la corrección de Bridgman se siguió el procedimiento explicado en la sección 3.6, mostrándose los resultados para cada ensayo en la tabla 4.2.

**Tabla 4.2.** Valores de esfuerzo máximo, esfuerzo de Bridgman, deformación máxima y deformación de Bridgman para cada ensayo de tracción.

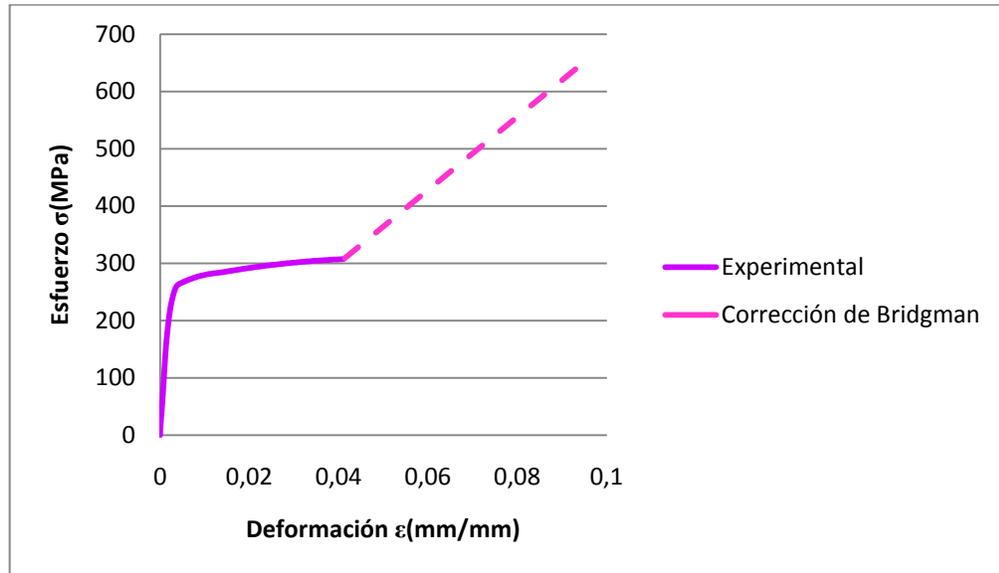
	$S_{\text{máx}}$ (MPa)	$e_{\text{máx}}$ (mm/mm)	$S_{\text{Bridgman}}$ (MPa)	$e_{\text{Bridgman}}$ (mm/mm)
<b>TR1</b>	262,5167	0,0800	468,9003	0,1379
<b>TR2</b>	271,2853	0,0639	562,1004	0,1246
<b>TR3</b>	307,5536	0,0411	638,9007	0,0929
<b>TR4</b>	255,3574	0,0467	536,5969	0,1069
<b>TR5</b>	284,5169	0,0691	534,5465	0,1256
<b>TRE1</b>	184,5375	0,0439	434,0916	0,1090
<b>TRE2</b>	122,6998	0,0630	221,1650	0,1390
<b>TRE3</b>	139,1684	0,0779	276,1840	0,1381
<b>TRE4</b>	156,7600	0,0743	329,7380	0,1390
<b>TRE5</b>	143,9015	0,0643	283,2055	0,1379



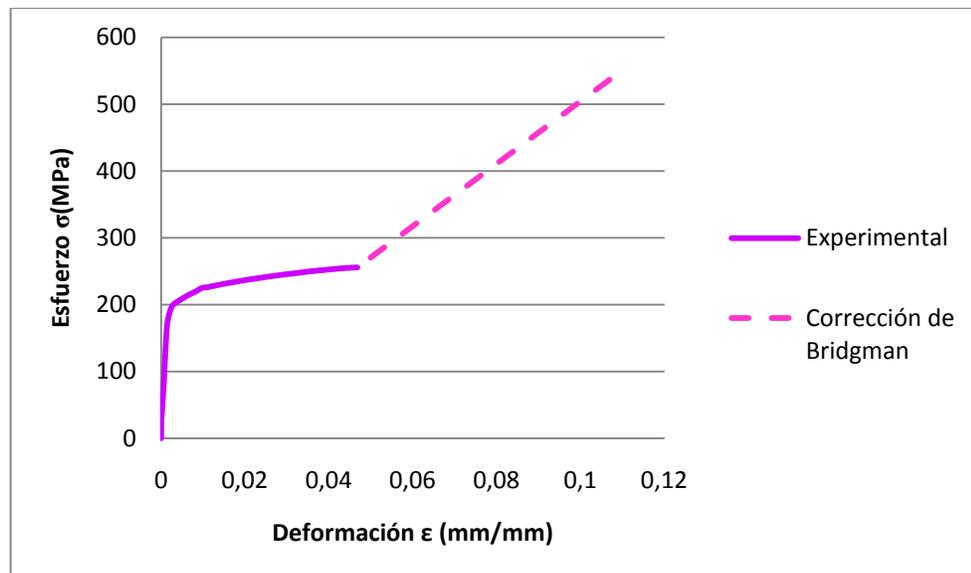
**Figura 4.3.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción sin envejecimiento.



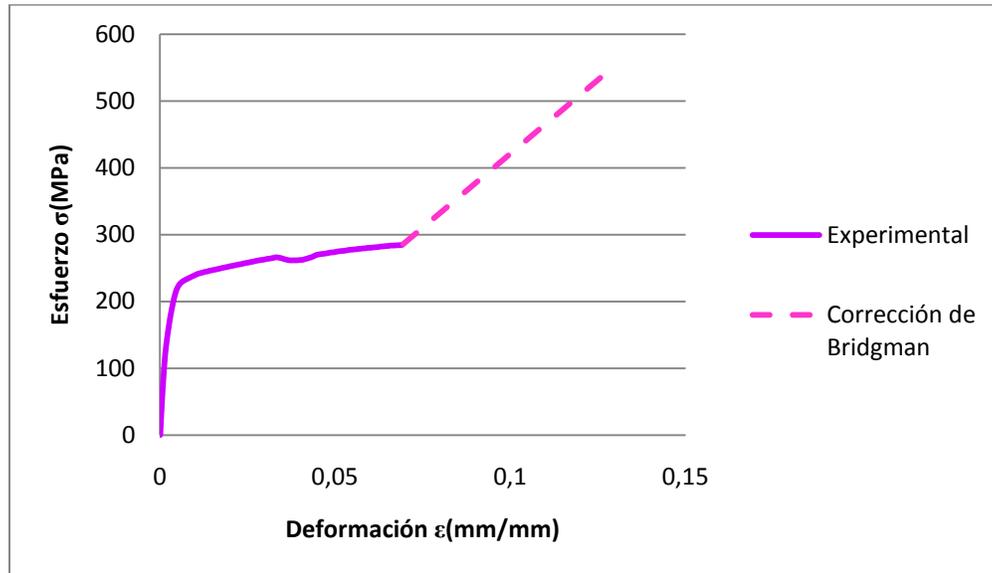
**Figura 4.4.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción sin envejecimiento.



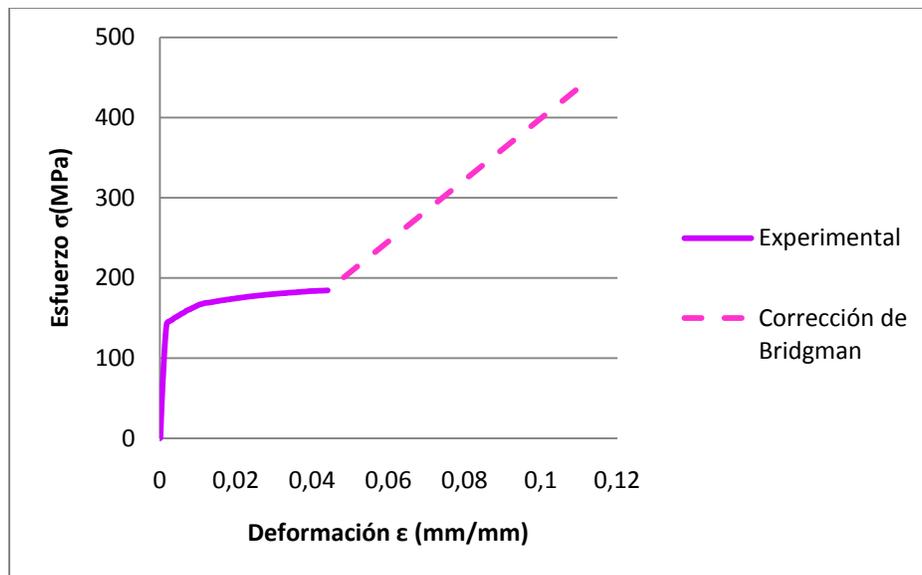
**Figura 4.5.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción sin envejecimiento.



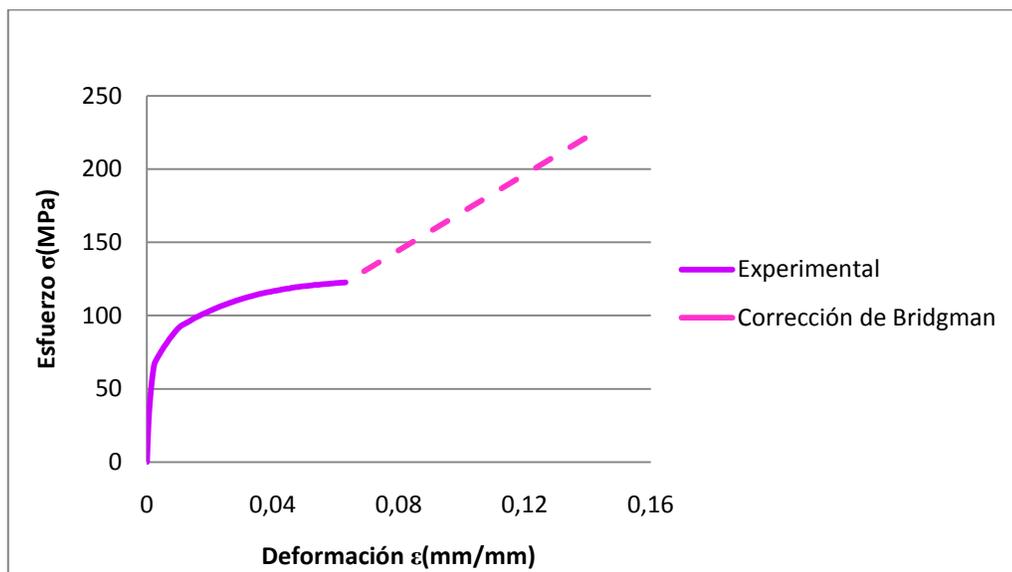
**Figura 4.6.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción sin envejecimiento.



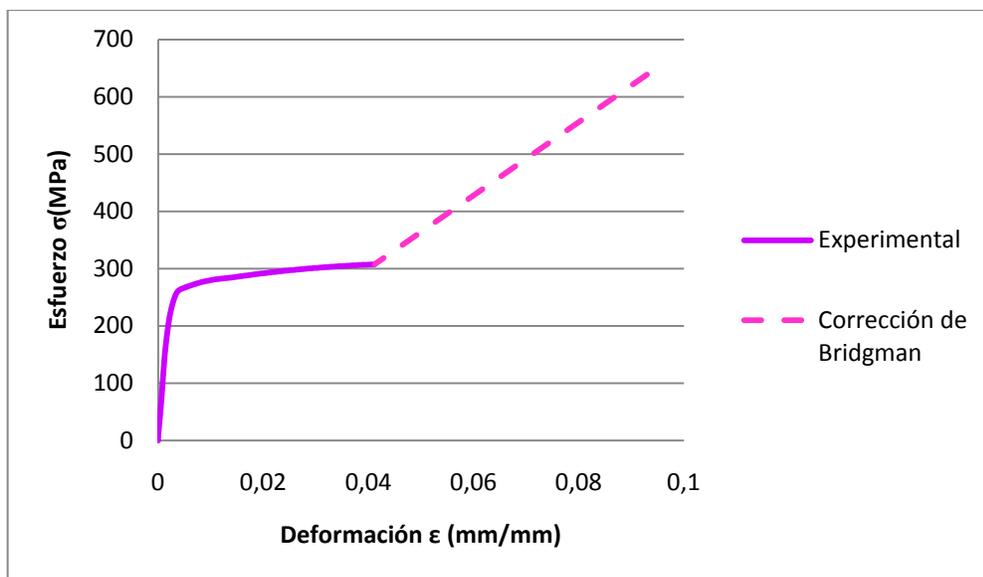
**Figura 4.7.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción sin envejecimiento.



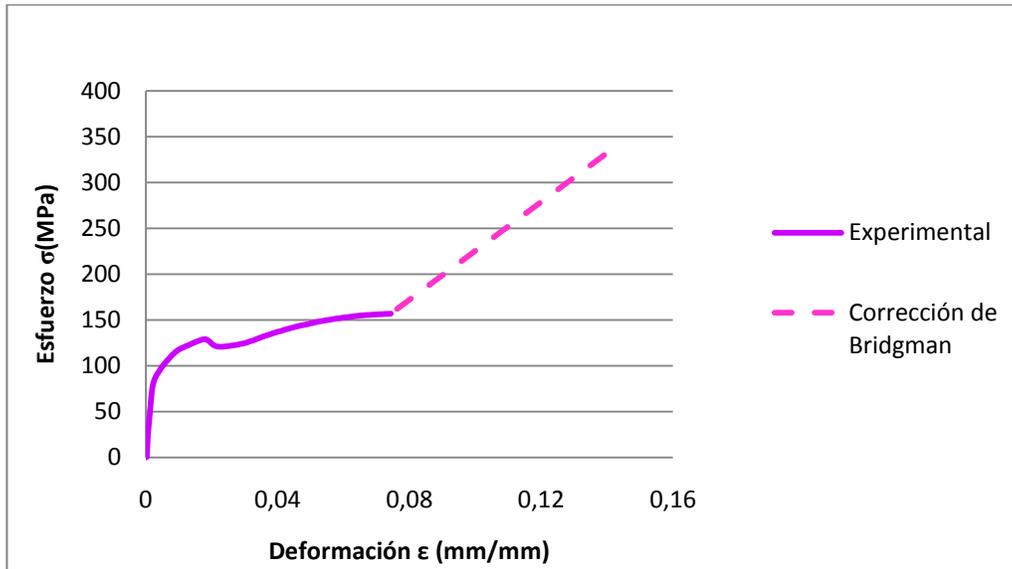
**Figura 4.8.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción con envejecimiento.



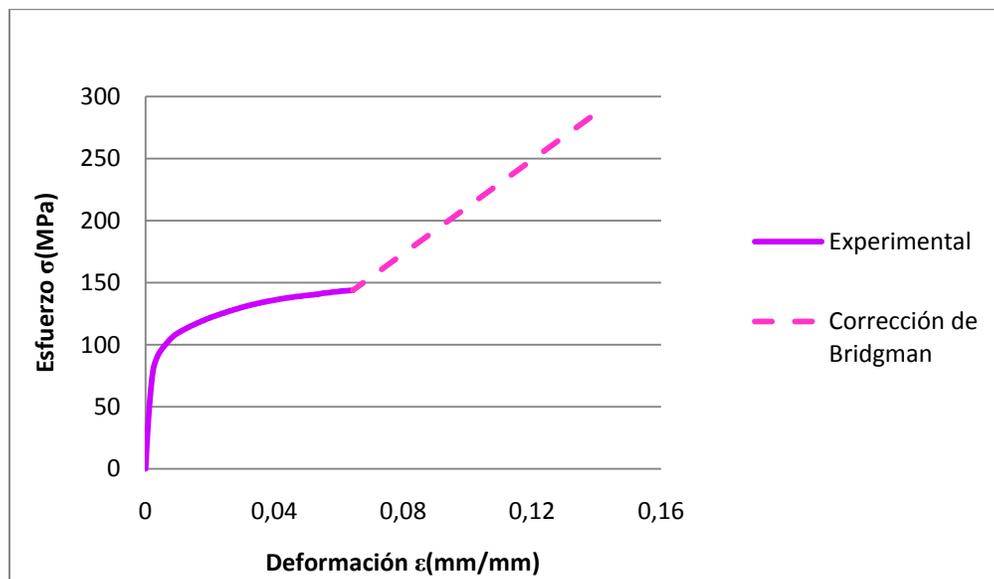
**Figura 4.9.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción con envejecimiento.



**Figura 4.10.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción con envejecimiento.



**Figura 4.11.** Curva esfuerzo vs deformación real de un ensayo de tracción con envejecimiento.



**Figura 4.12.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción con envejecimiento.



Debido a la alta ductilidad de la aleación estudiada, el área de fractura de las probetas ensayadas presenta una reducción de área promedio del 73,67% como se muestra en la tabla 4.3, un valor alto en comparación con los encontrados en la literatura para el aluminio con un valor del 20% de reducción, trayendo como consecuencia un aumento en el esfuerzo corregido debido a que este es inversamente proporcional al área de ruptura.

**Tabla 4.3.** Porcentaje de reducción de área de las probetas de tracción.

Muestra	% RA	Muestra	% RA
TR1	68,64	TRE1	76,96
TR2	72,12	TRE2	76,96
TR3	70,40	TRE3	76,96
TR4	72,12	TRE4	76,96
TR5	68,64	TRE5	76,96

La corrección de Brigdman no se utilizó para la comparación entre los modelos estudiados y la curva experimental, debido a que los resultados arrojados no fueron satisfactorios.

#### **4.3. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE MIRAMBELL-REAL Y ABDELLA.**

Se calcularon los parámetros de las ecuaciones de Ramberg-Osgood, Mirambell-Real y Abdella, siguiendo la metodología descrita en la sección 3.4 y el exponente “m” de Mirambell-Real según las ecuaciones 4.1 a 4.3. Los resultados se muestran en las tablas 4.4 y 4.5.

Tabla 4.4. Parámetros de la ecuación de Ramberg-Osgood y Mirambell-Real.

Muestra	$S_u$	$e_u$	$E_0$	$S_{0,01}$	$S_{0,2}$	$e_{0,2}$	$n$	$E_{0,2}$	$m$	$R^2$
TR1	242,3	0,0825	969,1	124,0	128,1	0,1341	98,16	390,7	10,65	0,993
TR2	254,4	0,0660	993,7	100,5	117,5	0,1202	19,14	750,6	9,17	0,996
TR3	295,1	0,0420	1188,5	150,5	158,2	0,1351	60,26	623,7	9,00	0,997
TR4	243,6	0,0478	1287,7	129,1	149,0	0,1177	20,82	946,9	7,66	0,998
TR5	265,5	0,0715	831,2	103,1	110,5	0,1349	42,73	506,1	10,93	0,986
TRE1	176,5	0,0449	914,8	101,1	114,5	0,1272	23,83	662,6	8,76	0,989
TRE2	115,1	0,0651	472,6	32,7	34,5	0,0749	57,28	183,9	8,62	0,990
TRE3	128,7	0,0810	388,2	54,8	61,1	0,1595	27,71	287,1	5,73	0,985
TRE4	145,5	0,0771	401,2	64,9	70,5	0,1779	36,36	283,8	4,97	0,973
TRE5	134,9	0,0664	508,1	12,7	23,6	0,0484	4,83	420,6	9,73	0,995
LC1	339,5	0,6914	3197,2	77,9	100,7	0,0335	11,66	1838,8	1,04	0,988
LC2	339,5	0,3408	9049,8	123,1	160,1	0,0196	11,38	3956,6	1,16	0,994
LC3	339,5	0,3575	5478,5	120,6	145,5	0,0285	15,91	2492,9	1,28	0,995
LC4	341,9	0,3112	10334,9	166,5	184,9	0,0198	28,55	2465,6	1,03	0,996
LC5	338,5	0,3501	6183,7	130,7	149,9	0,0262	21,91	2202,4	1,30	0,995
LCE1	339,5	0,4180	8489,2	102,8	120,2	0,0161	19,20	2287,1	1,24	0,990
LCE2	339,5	0,4267	6128,6	114,5	130,1	0,0232	23,54	1903,8	1,10	0,992
LCE3	339,5	0,4558	4468,1	111,1	132,2	0,0297	17,13	2112,9	1,09	0,992
LCE4	339,6	0,4369	4208,9	119,2	138,0	0,0347	20,47	1872,1	1,06	0,992
LCE5	339,5	0,4288	6123,4	109,3	129,2	0,0231	17,80	2261,5	1,17	0,991
T1	157,7	2,9839	9978,1	72,3	100,9	0,0121	12,97	2598,4	2,89	0,996
T2	171,1	3,7195	7058,4	83,1	101,9	0,0164	14,73	2321,2	2,82	0,998
T3	169,5	3,1296	9282,6	98,9	118,8	0,0148	16,31	2615,6	2,94	0,998
T4	168,7	2,6100	10216,5	100,9	112,4	0,0130	27,68	1694,1	2,83	0,995
T5	172,3	3,8443	12511,4	84,3	100,5	0,0100	12,06	2383,2	2,66	0,996
TE1	155,1	4,9356	4021,8	42,7	61,1	0,0171	8,39	1910,3	3,06	0,998
TE2	157,5	4,9102	4329,7	45,8	64,4	0,0169	8,78	1983,8	2,98	0,998
TE3	162,2	5,6576	3518,2	43,3	60,2	0,0191	9,07	1708,3	2,89	0,997
TE4	152,9	4,4868	4713,1	46,4	66,5	0,0161	8,32	2162,6	3,10	0,997
TE5	159,3	5,6342	5836,1	61,2	73,6	0,0146	16,27	1629,3	2,56	0,996



Tabla 4.5. Parámetros de la ecuación de Abdella.

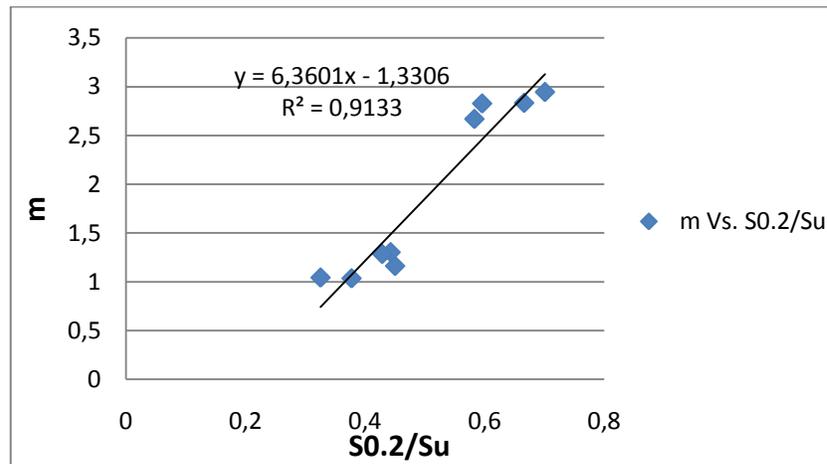
Muestra	r	r <sub>2</sub>	p	r*	E <sub>u</sub>	r <sub>u</sub>	P*
TR1	1,0163	0,6715	20,3832	36,9455	351,8	0,2182	0,8034
TR2	1,0169	0,7682	13,9393	35,5712	446,5	0,2116	0,8111
TR3	1,0150	0,5326	31,5707	18,5177	559,8	0,1662	0,8813
TR4	1,0172	0,7480	14,8320	46,6864	264,9	0,1306	0,8883
TR5	1,0150	0,6179	25,7902	22,9394	579,8	0,2628	0,7707
TRE1	1,0159	0,7359	16,8030	46,7076	169,3	0,1193	0,8999
TRE2	1,0273	0,3998	22,5058	14,6730	201,1	0,1604	0,9009
TRE3	1,0126	0,7491	20,0130	33,7896	170,8	0,2009	0,8233
TRE4	1,0113	0,7155	25,3047	28,5360	193,4	0,1945	0,8347
TRE5	1,0430	0,8635	3,3077	24,9209	255,1	0,1511	0,8843
LC1	1,0013	0,6801	240,1345	5,5159	712,2	1,1306	0,1596
LC2	1,0024	0,7042	122,1096	9,4602	509,2	0,4735	0,5886
LC3	1,0015	0,8835	76,7724	7,2526	480,5	0,4506	0,6371
LC4	1,0020	0,8347	80,3860	14,0385	344,8	0,3514	0,6982
LC5	1,0015	0,8414	102,1894	8,1072	356,9	0,3481	0,7435
LCE1	1,0030	0,8837	37,6975	12,1132	1200,6	1,2152	0,2346
LCE2	1,0017	0,7602	136,7338	8,3376	434,4	0,4867	0,5831
LCE3	1,0014	0,8679	92,7943	7,7040	474,2	0,5525	0,5141
LCE4	1,0011	0,8247	151,6503	6,3436	390,0	0,4460	0,6576
LCE5	1,0018	0,8003	108,3800	8,6243	511,1	0,5632	0,4940
T1	1,1976	0,4319	0,0205	61,6424	7,0	0,1212	0,8932
T2	1,1384	0,3744	0,0431	88,0253	3,1	0,1166	0,8935
T3	1,1106	0,5125	0,0335	82,5035	3,6	0,1117	0,8991
T4	1,1804	0,1937	0,0210	29,6449	6,1	0,1096	0,9214
T5	1,2582	0,2437	0,0372	74,3890	3,8	0,1134	0,8986
TE1	1,1650	0,1879	0,0368	29,3220	5,1	0,1601	0,8695
TE2	1,6798	0,1765	0,0431	30,0158	5,8	0,1893	0,8392
TE3	1,1167	0,5422	0,0263	40,3212	8,2	0,1940	0,8264
TE4	1,1416	0,5238	0,0311	59,0688	6,2	0,1710	0,8431
TE5	1,1658	0,3323	0,0329	48,9791	4,9	0,1408	0,8770

#### 4.4. OBTENCIÓN DE LA ECUACIÓN DEL EXPONENTE “m” DE MIRAMBELL-REAL.

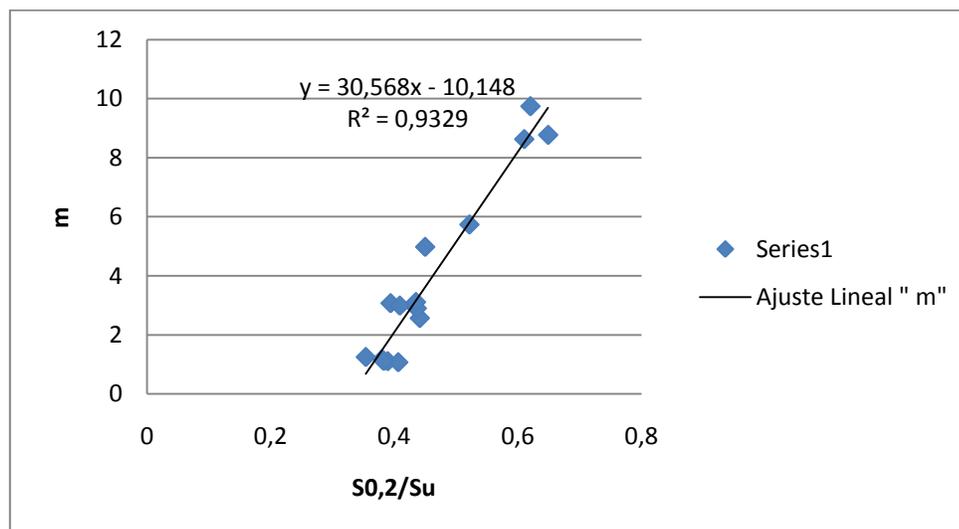
Se tabularon los valores de “m” y “ $S_{0.2}/S_u$ ” que se encuentran en la tabla 4.4, según lo propuesto por Rasmussen (2003), estos se encuentran de manera resumida en la tabla 4.6, con los que se realizó un ajuste de mínimos cuadrados lineal según lo mostrado en las figuras 4.13 a 4.15

**Tabla 4.6.** Valores de “m” y “ $S_{0.2}/S_u$ ” para cada ensayo.

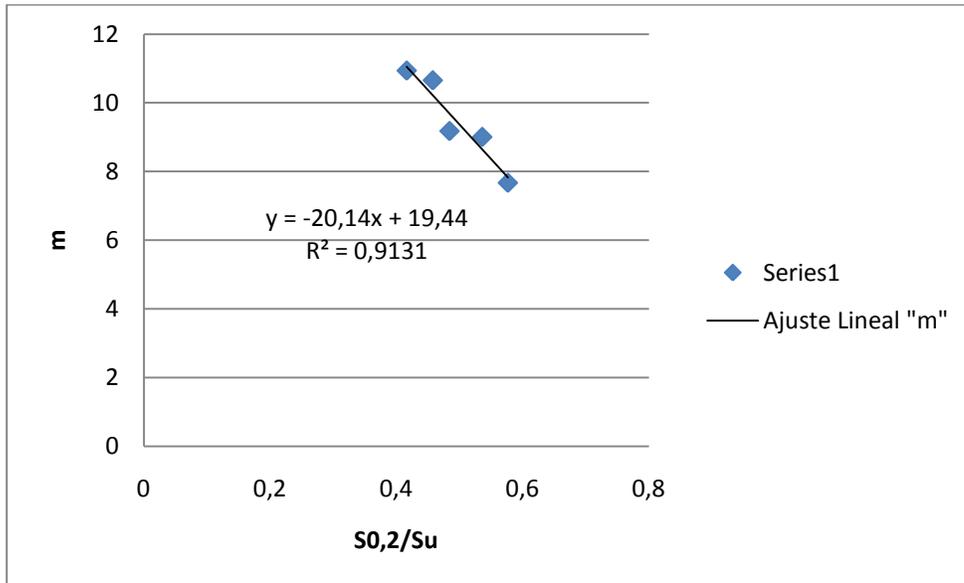
Muestra	m	$S_{0.2}/S_u$	$R^2$	Muestra	m	$S_{0.2}/S_u$	$R^2$
TE1	3,0649	0,3941	0,9984	T1	2,8953	0,6420	0,9962
TE2	2,9829	0,4090	0,9975	T2	2,8279	0,5959	0,9985
TE3	2,8939	0,4364	0,9973	T3	2,9459	0,7010	0,9986
TE4	3,1040	0,4351	0,9977	T4	2,8339	0,6661	0,9953
TE5	3,5619	0,4413	0,9970	T5	2,6689	0,5829	0,9963
LCE1	1,2429	0,3541	0,9904	LC1	1,0419	0,3257	0,9884
LCE2	1,1089	0,3830	0,9924	LC2	1,1608	0,4503	0,9942
LCE3	1,0986	0,3896	0,9920	LC3	1,2839	0,4287	0,9956
LCE4	1,0649	0,4065	0,9929	LC4	1,0338	0,3775	0,9964
LCE5	1,1709	0,3805	0,9915	LC5	1,3019	0,4428	0,9959
TRE1	8,7659	0,6488	0,9898	TR1	10,6541	0,4576	0,9938
TRE2	8,6219	0,6102	0,9910	TR2	9,1749	0,4841	0,9970
TRE3	5,7309	0,5216	0,9836	TR3	9,0031	0,5360	0,9975
TRE4	4,9729	0,4500	0,9733	TR4	7,6659	0,5765	0,9986
TRE5	7,7369	0,6202	0,9954	TR5	10,9381	0,4164	0,9868



**Figura 4.13.** Ajuste por mínimos cuadrados lineal de "m" para ensayos de torsión y compresión sin tratamiento térmico.



**Figura 4.14.** Ajuste por mínimos cuadrados lineal de "m" para todos los ensayos con tratamiento térmico.



**Figura 4.15.** Ajuste por mínimos cuadrados lineal de “m” para ensayos de tracción sin tratamiento térmico.

Al realizar el ajuste por mínimos cuadrados se obtuvieron las siguientes expresiones para el exponente “m” de Mirambell-Real:

$$m = 6,3601 * \left(\frac{S_{0,2}}{S_u}\right) - 1,3306 \quad (4.1)$$

$$m = 30,56 * \left(\frac{S_{0,2}}{S_u}\right) - 10,158 \quad (4.2)$$

$$m = 19,44 - 20,14 * \left(\frac{S_{0,2}}{S_u}\right) \quad (4.3)$$

No se pudo conseguir una única ecuación para el exponente “m” de Mirambell-Real, debido a las variaciones de los resultados, arrojando un coeficiente de correlación de 42%. En búsqueda de obtener un buen ajuste, se dividieron los ensayos en envejecidos y sin envejecer, pero los valores sin envejecer de los ensayos de tracción arrojaban una pendiente distinta a los de compresión y torsión, por lo que se tuvo que plantear las siguientes tres ecuaciones, que fueron las que arrojaron los



mejores valores de correlación: para los ensayos de torsión y compresión sin tratamiento térmico ecuación 4.1 con un coeficiente de correlación de 91,33%, para todos los ensayos con tratamiento térmico ecuación 4.2 con un coeficiente de correlación de 93,29% y por último, para los ensayos de tracción sin tratamiento térmico ecuación 4.3 con un coeficiente de correlación de 91,31%, los cuales se consideran unas correlaciones muy fuertes. (Mata et al 2004)

Los valores del exponente “m” determinados según las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3 se muestran en la tabla 4.7.

**Tabla 4.7.** Valores de “m” y de correlación según las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3.

Probeta	m	R <sup>2</sup>
TR1	8,7553	0,9938
TR2	10,1388	0,9969
TR3	8,6443	0,9974
TR4	7,1232	0,9985
TR5	11,0536	0,9867
TRE1	8,6868	0,9898
TRE2	8,0074	0,9909
TRE3	13,3756	0,9855
TRE4	13,6756	0,9733
TRE5	7,2032	0,9954
LC1	0,5567	0,9884
LC2	1,6689	0,9941
LC3	1,3963	0,9956
LC4	2,1094	0,9963
LC5	1,4859	0,9958
LCE1	0,6773	0,9903
LCE2	1,5615	0,9924
LCE3	1,7621	0,9920
LCE4	2,2781	0,9928
LCE5	1,4843	0,9914

Tabla 4.7. Continuación.

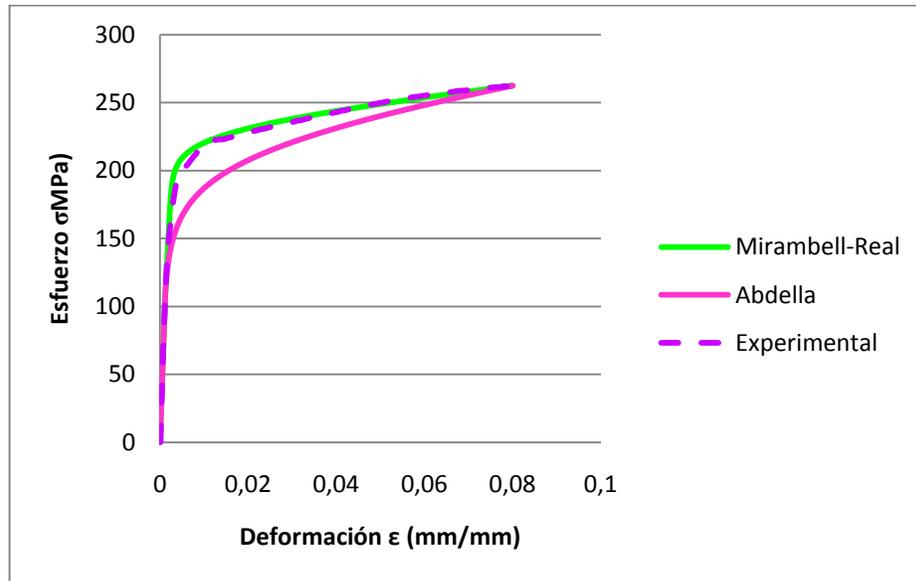
Probeta	m	R <sup>2</sup>
TE5	3,9576	0,9969
T1	2,9589	0,9961
T2	2,4596	0,9985
T3	3,1269	0,9986
T4	4,3633	0,9953
T5	2,3773	0,9963
TE1	2,8897	0,9983
TE2	2,3466	0,9983
TE3	2,2005	0,9973
TE4	3,1444	0,9977
TE5	3,9576	0,9969

#### 4.5. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN EXPERIMENTAL CON LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS EVALUADOS.

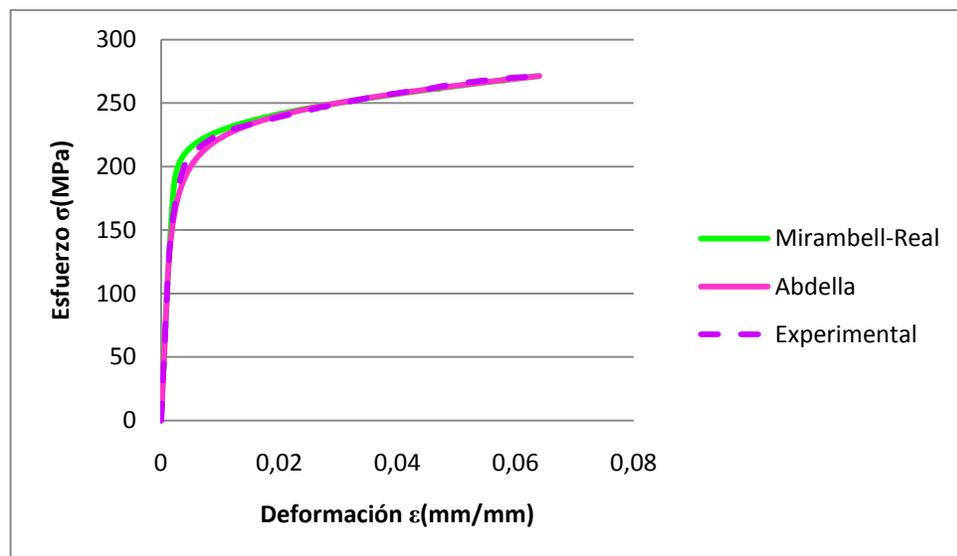
En las figuras 4.16 a 4.45, se comparan las curvas esfuerzo-deformación real experimentales con las curvas obtenidas a partir de los modelos de Mirambell-Real y la aproximación explícita de Abdella para todos los ensayos.

Para el modelo de Mirambell-Real se usó la ecuación 2.12, y para Abdella la ecuación 2.29. En ambos casos se usó el exponente “m” de las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3 según el caso. Las comparaciones se presentan en las figuras 4.16 a 4.45.

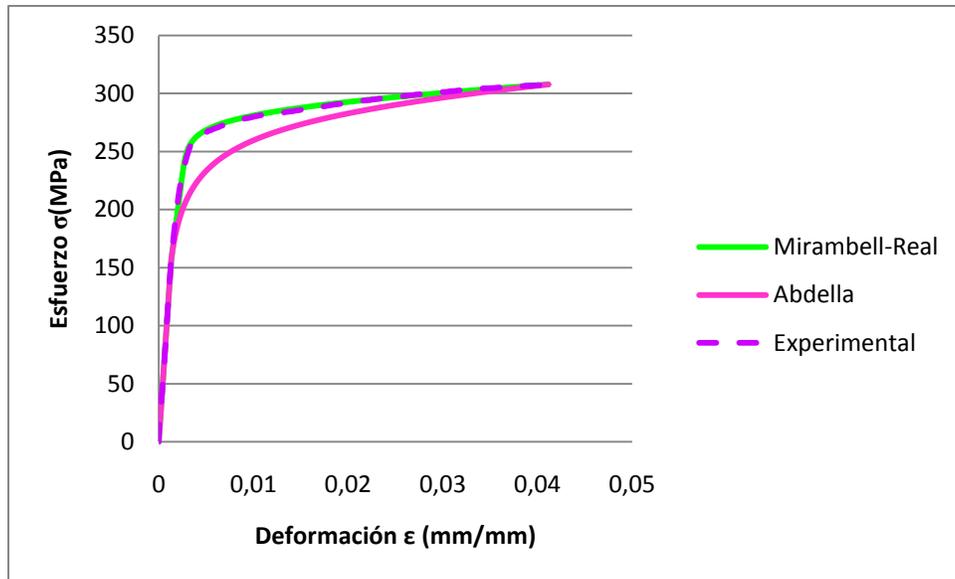
#### 4.5.1 Curvas esfuerzo-deformación efectiva a tracción:



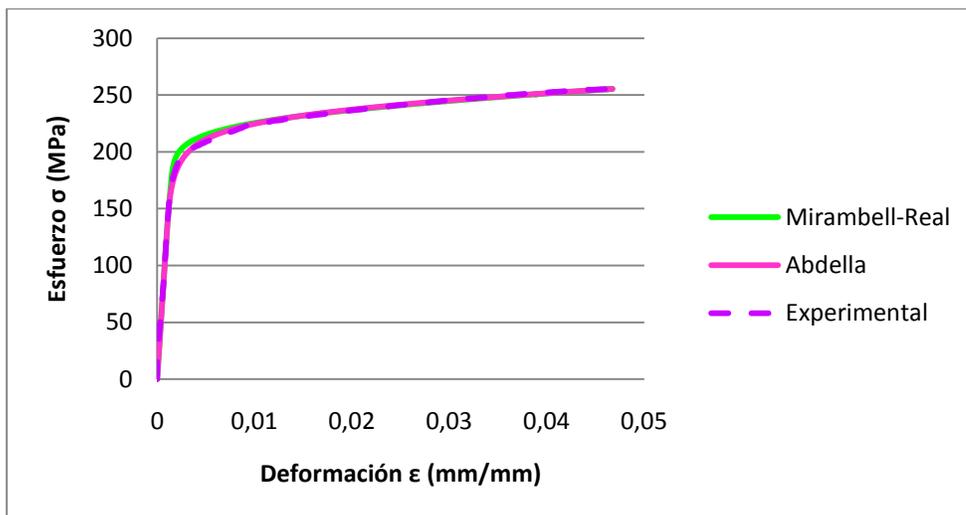
**Figura 4.16.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción sin envejecimiento.



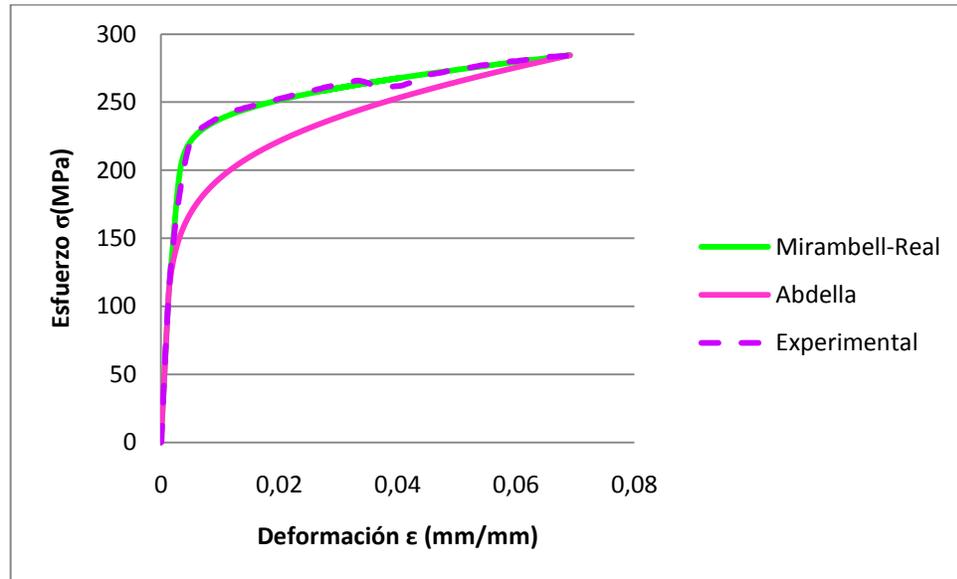
**Figura 4.17.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción sin envejecimiento.



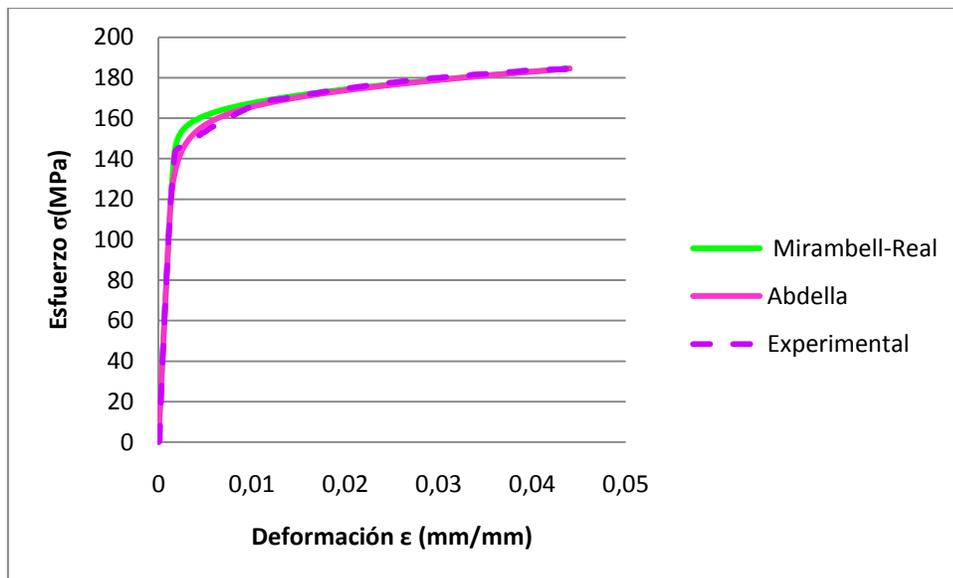
**Figura 4.18.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción sin envejecimiento.



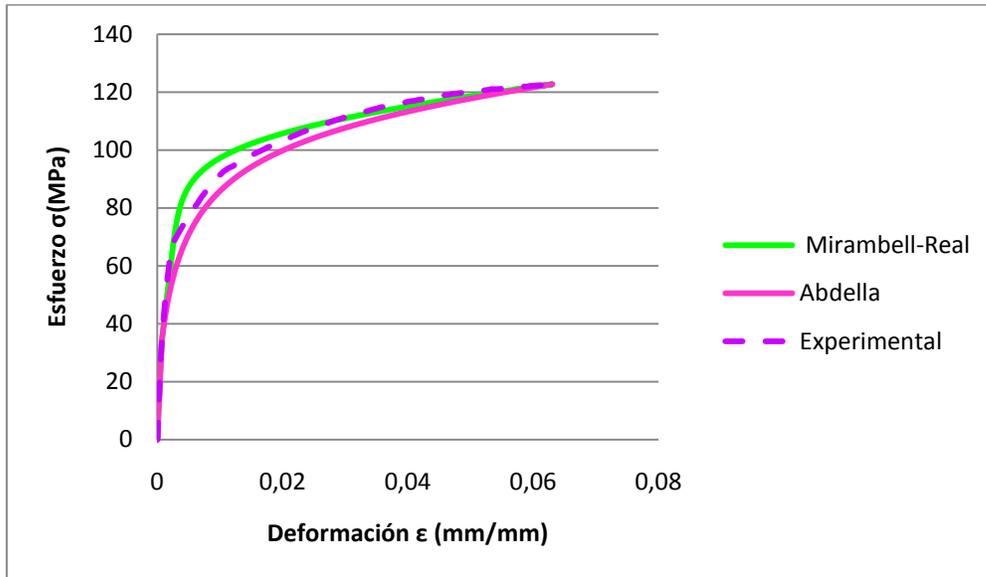
**Figura 4.19.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción sin envejecimiento.



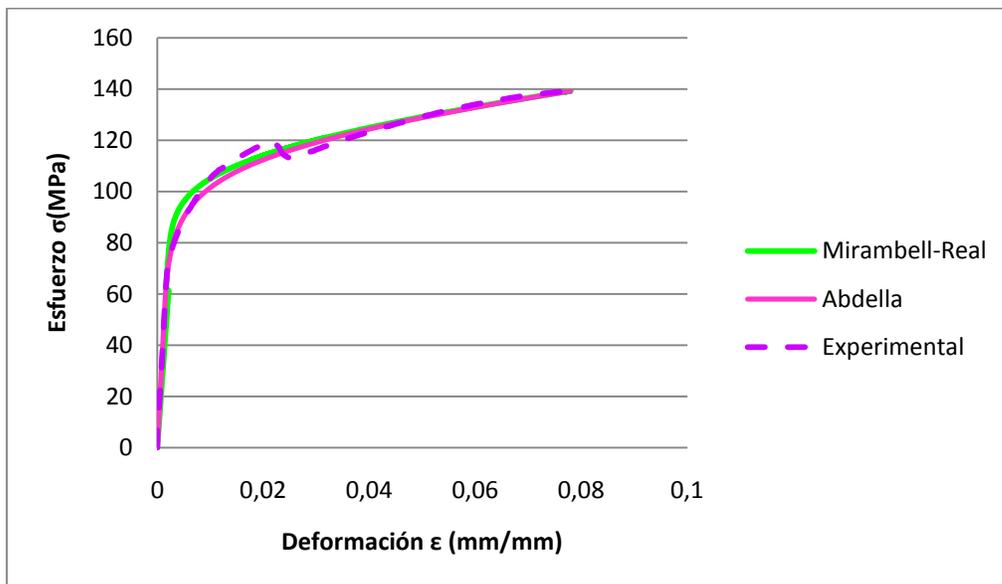
**Figura 4.20.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción sin envejecimiento.



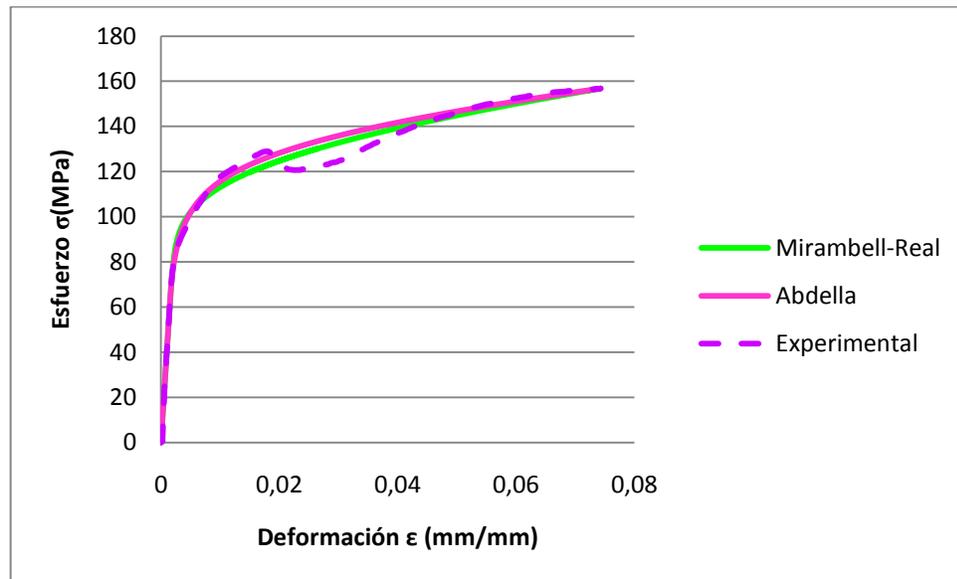
**Figura 4.21.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción con envejecimiento.



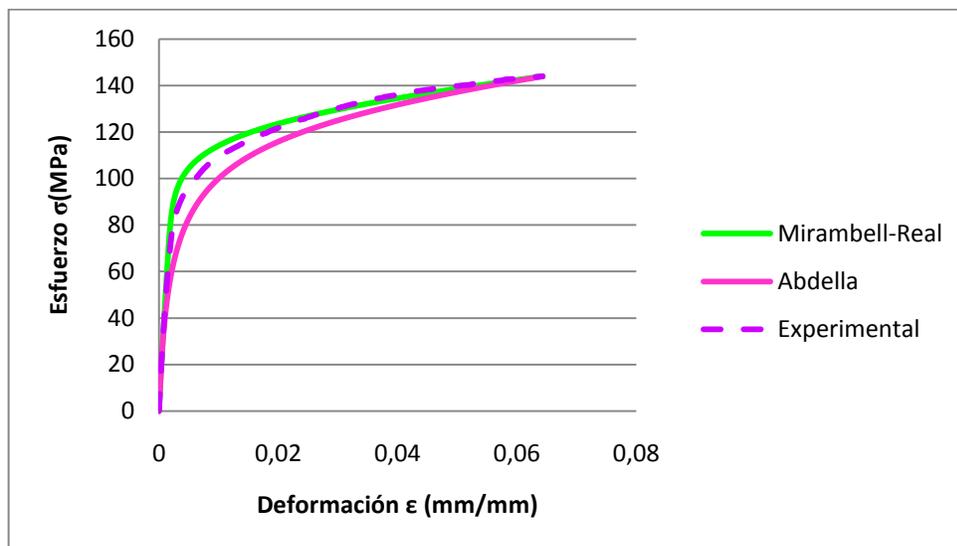
**Figura 4.22.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción con envejecimiento.



**Figura 4.23.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción con envejecimiento.



**Figura 4.24.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción con envejecimiento.



**Figura 4.25.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de tracción con envejecimiento.

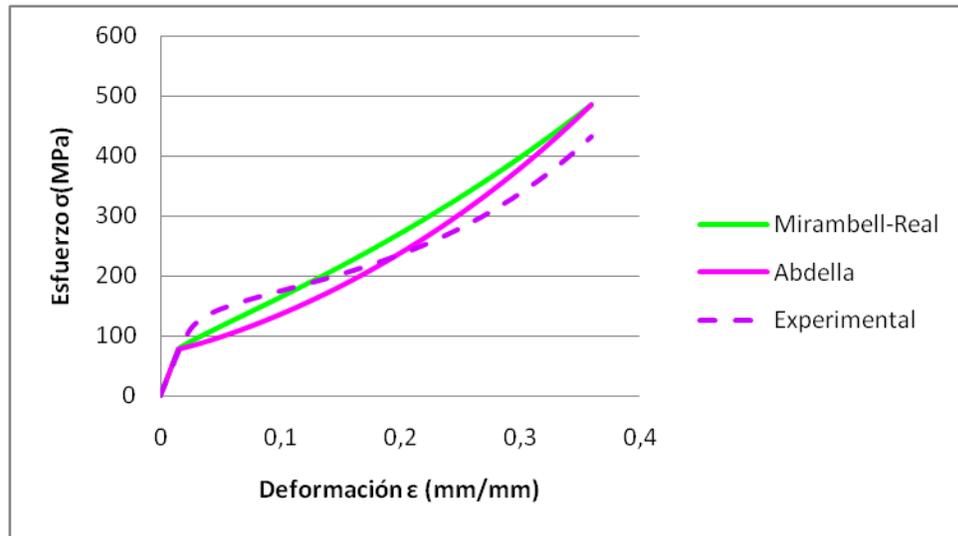


Como se puede observar en las figuras 4.16 a 4.20 en la mayoría de los casos para los ensayos de tracción sin envejecimiento, el modelo de Mirambell-Real sobrestima a la curva experimental, mientras que la aproximación explícita de Abdella en la mayoría de los casos subestima la curva experimentales.

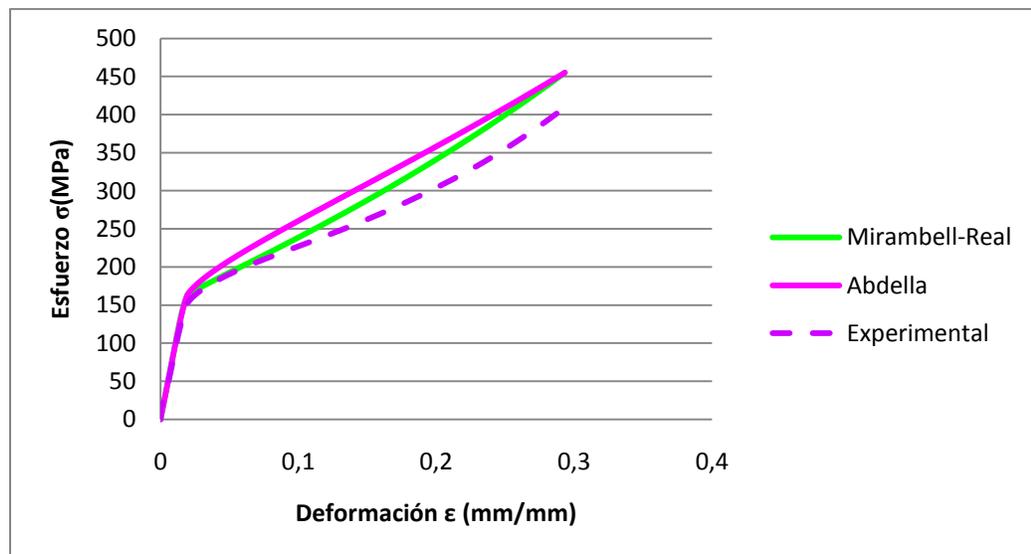
Para los ensayos de tracción con envejecimiento el modelo de Mirambell-Real se encuentra por encima de los valores esfuerzos, mientras que Abdella en algunos casos se mantiene por debajo de la curva experimental y en otros por encima. Como se muestra en las figuras 4.21 a 4.25.

Tanto en los ensayos con envejecimiento como en los sin envejecimiento la diferencia de las curvas experimentales con las curvas de los modelos de Mirambell-Real y Abdella, es en la zona del codo o zona de transición elastoplástica. Esto se puede explicar por el hecho de que estos modelos fueron inicialmente concebidos para aceros inoxidable, los cuales poseen una zona de transición elastoplástica menos marcada en comparación al material estudiado en este trabajo, es decir, la aleación de aluminio AA-6063 presenta un rango de deformación mayor en la zona de transición elastoplástica.

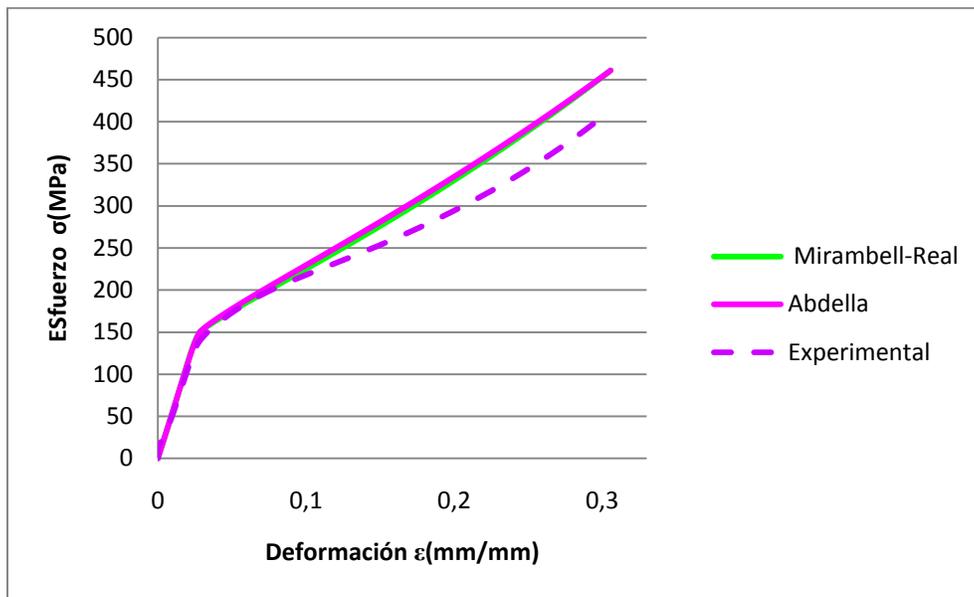
#### 4.5.2 Curvas esfuerzo-deformación efectiva a compresión:



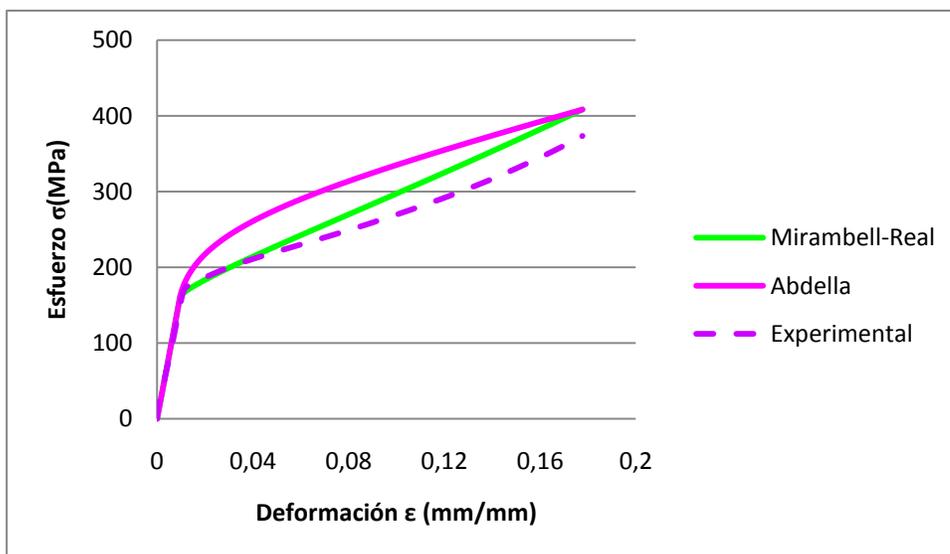
**Figura 4.26.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de compresión sin envejecimiento.



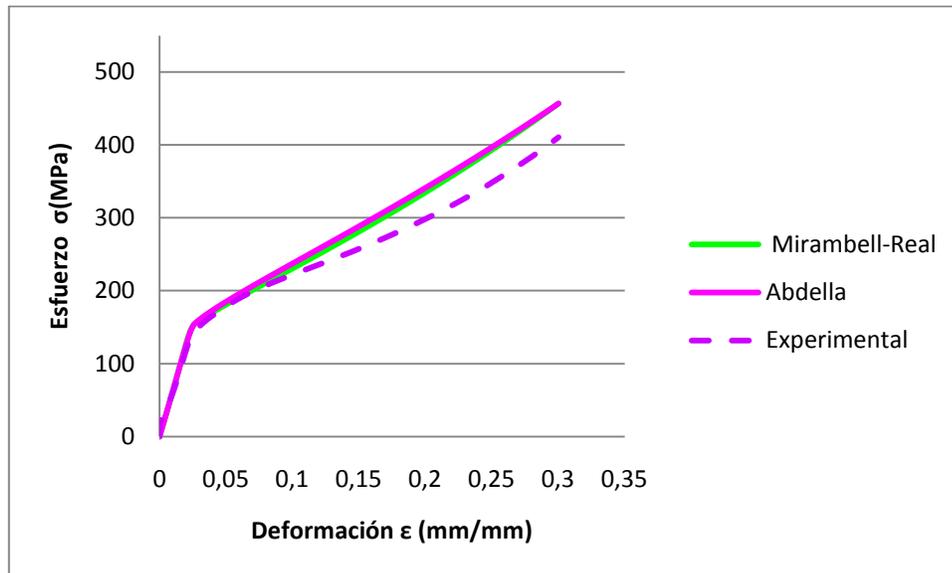
**Figura 4.27.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de compresión sin envejecimiento.



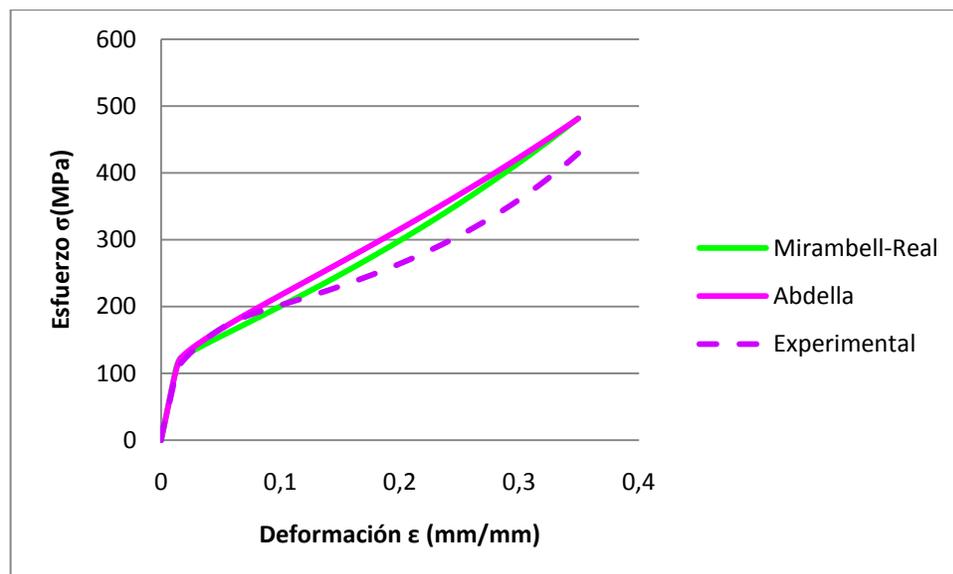
**Figura 4.28** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de compresión sin envejecimiento.



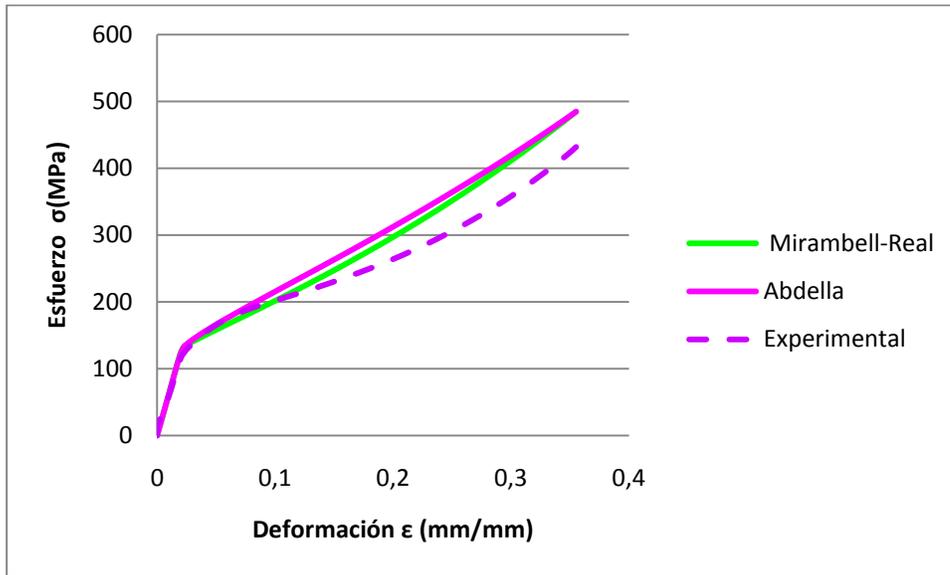
**Figura 4.29.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de compresión sin envejecimiento.



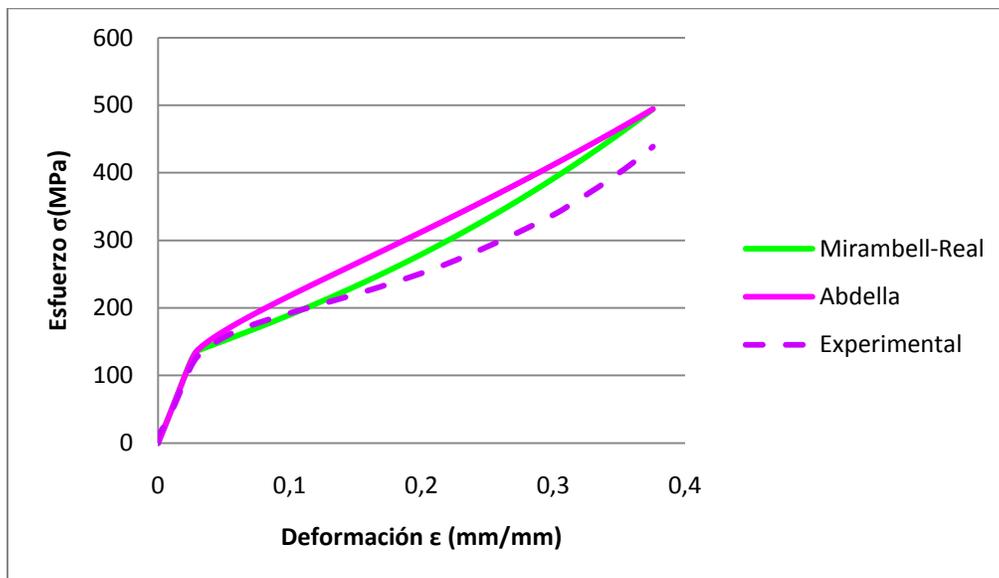
**Figura 4.30.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de compresión sin envejecimiento.



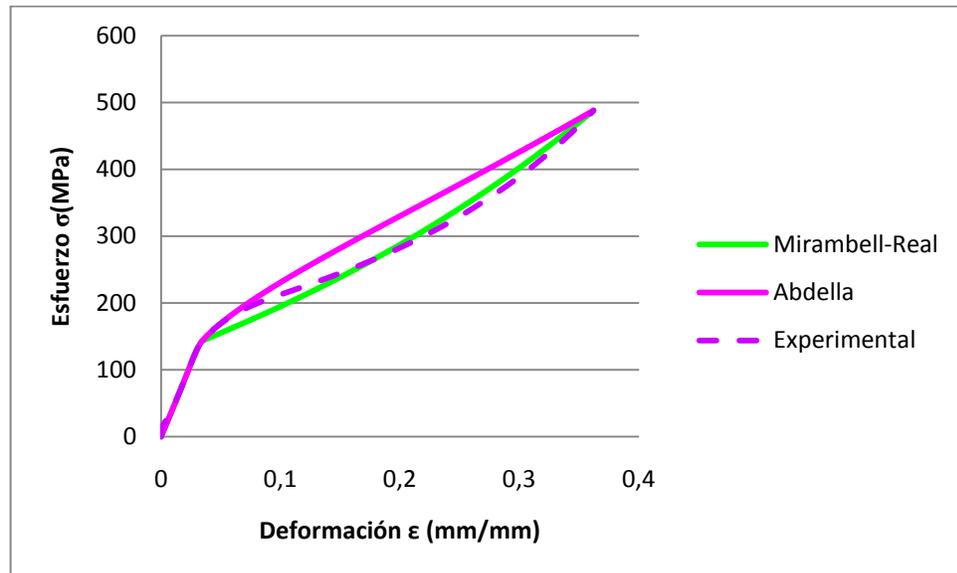
**Figura 4.31.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de compresión con envejecimiento.



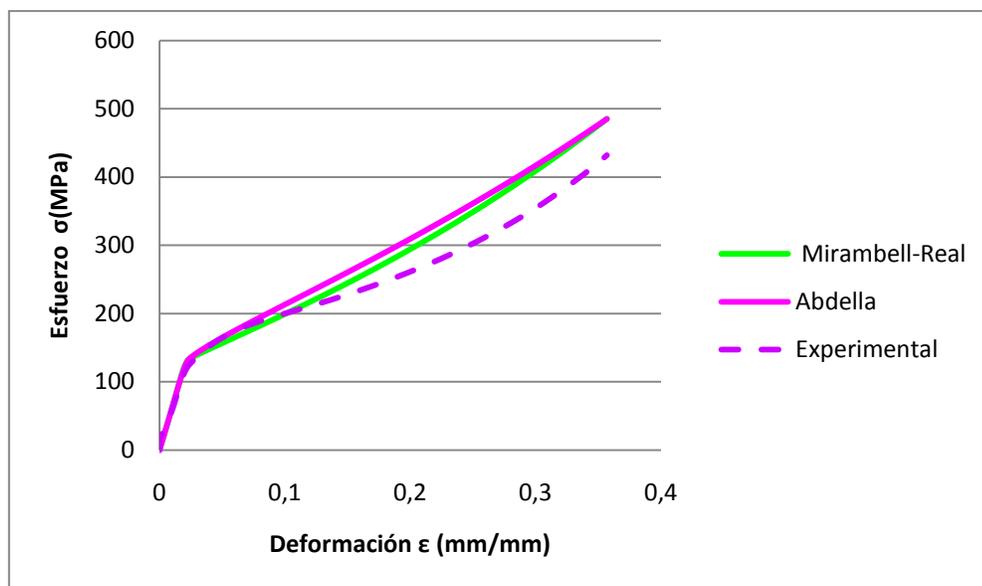
**Figura 4.32.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de compresión con envejecimiento.



**Figura 4.33.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de compresión con envejecimiento.



**Figura 4.34.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de compresión con envejecimiento.



**Figura 4.35.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de compresión con envejecimiento.

En los ensayos de compresión como se pudo observar en las figuras 4.26 a 4.35, todas las curvas de Mirambell-Real y Abdella se encuentran por encima de la curva experimental, es decir que los valores de estos dos modelos sobrestiman la curva experimental, comenzando la divergencia de las curvas entre ellas en el rango de (0,081-0,112) mm/mm.

La desviación en estos ensayos puede deberse a que en compresión no existe un punto de máximo esfuerzo y estos modelos matemáticos se basan en este punto, es por ello que nos vimos en la necesidad de llevar todos los ensayos hasta un punto de carga estándar. Otra posible causa de dicha desviación, es que Mirambell-Real y Abdella no toman en cuenta la fricción existente entre los platos de compresión y la probeta, haciendo que la carga se eleve, mientras que en la curva experimental fue corregida esta fricción.

A las probetas de compresión cortadas transversalmente no se les pudo realizar el estudio elastoplástico, ya que al hacer los ensayos estos presentaron deformaciones no cilíndricas en las probetas como se observa en la figura 4.36, lo que impide la utilización de los parámetros de compresión cilíndrica y por tal motivo se descartaron los resultados obtenidos.



Figura 4.36. Imagen de las probetas de compresión cilíndrica cortadas transversalmente.

#### 4.5.3 Curvas esfuerzo-deformación efectiva a torsión:

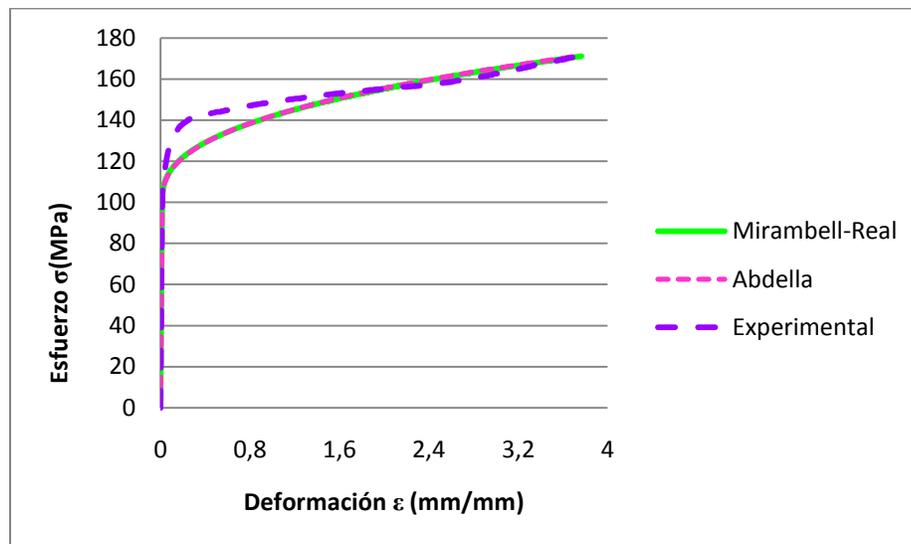
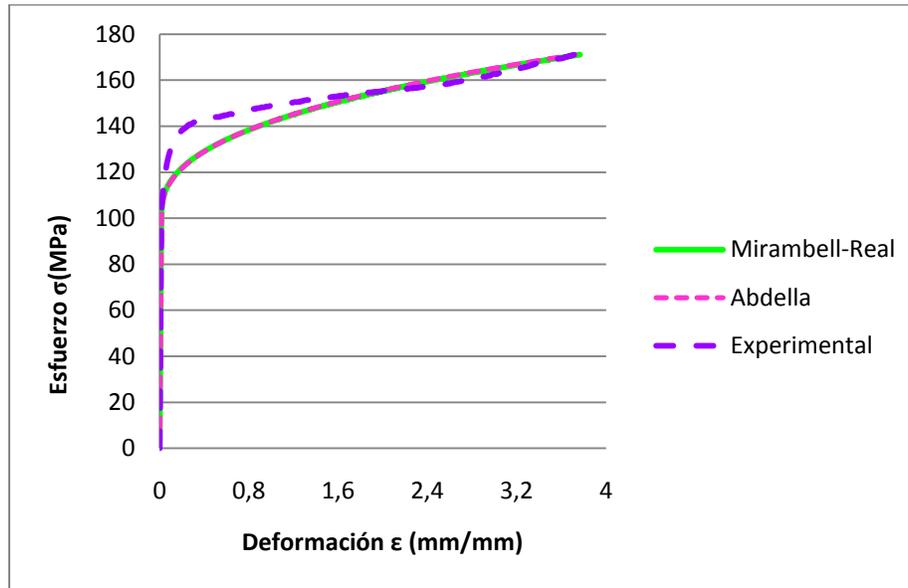
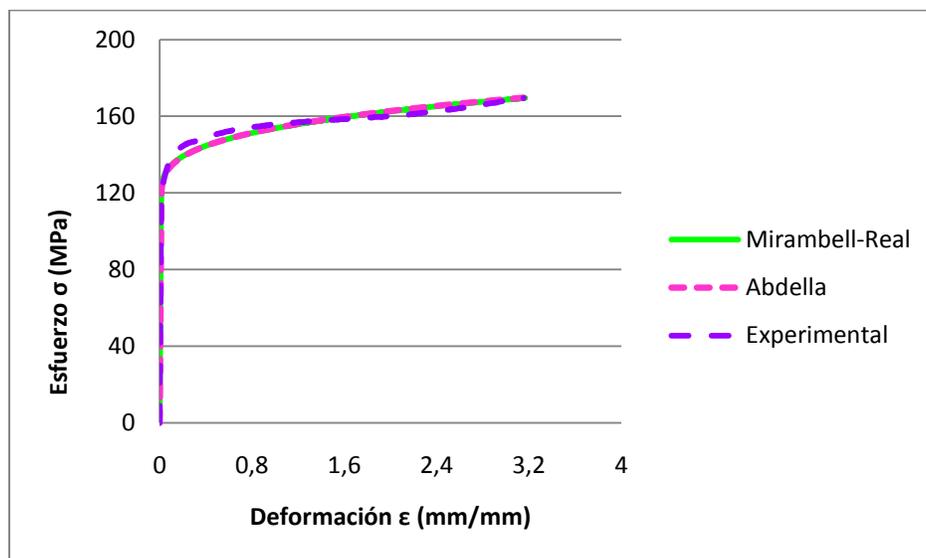


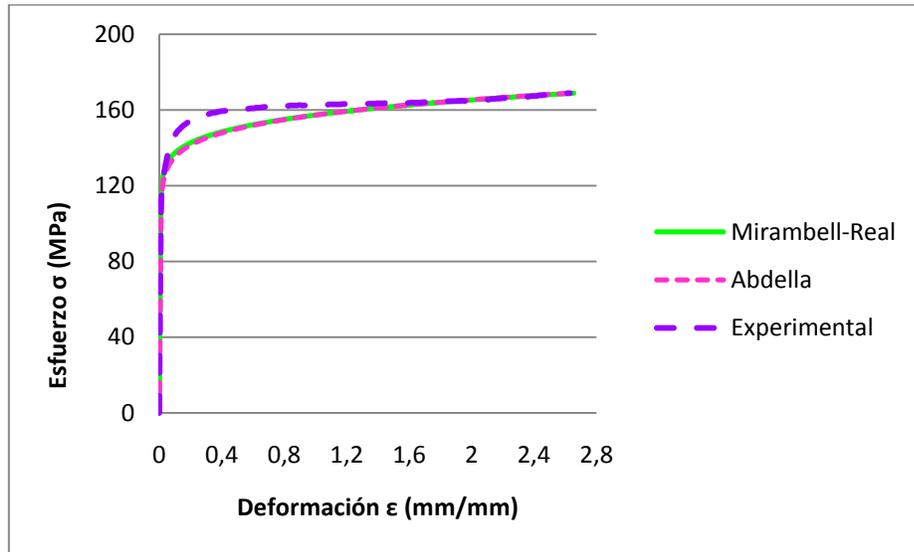
Figura 4.37. Curva esfuerzo vs deformación efectiva un ensayo de torsión sin envejecimiento.



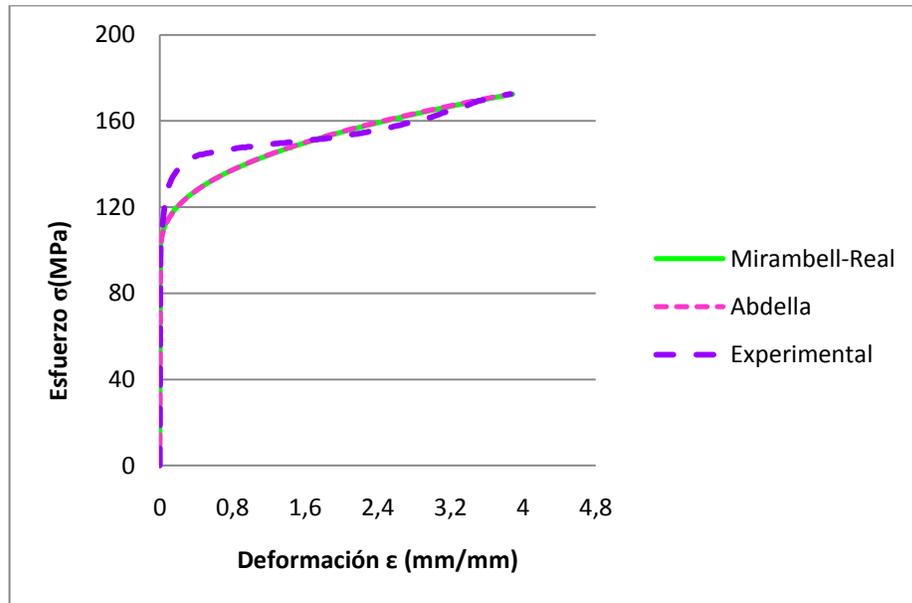
**Figura 4.38.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva un ensayo de torsión sin envejecimiento.



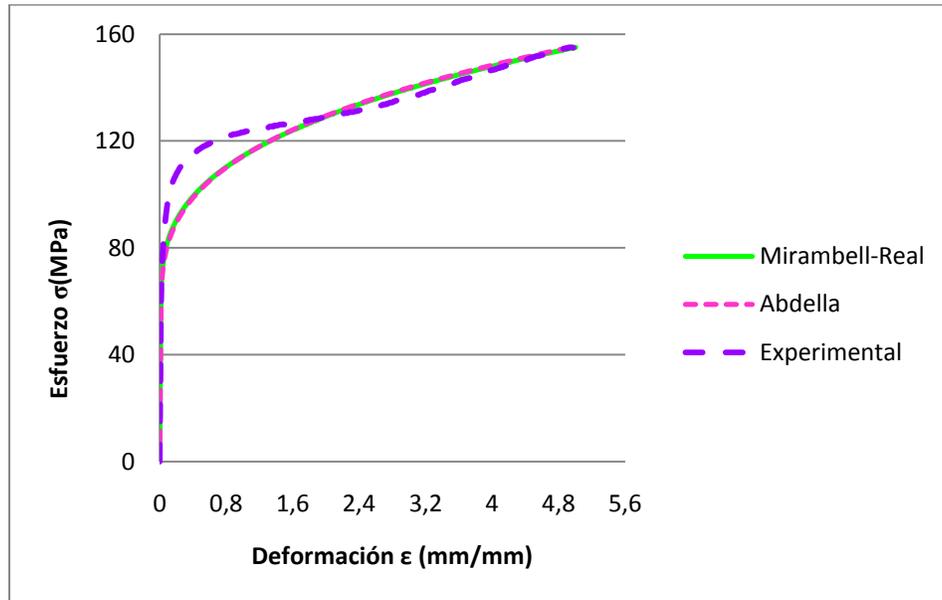
**Figura 4.39.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva un ensayo de torsión sin envejecimiento.



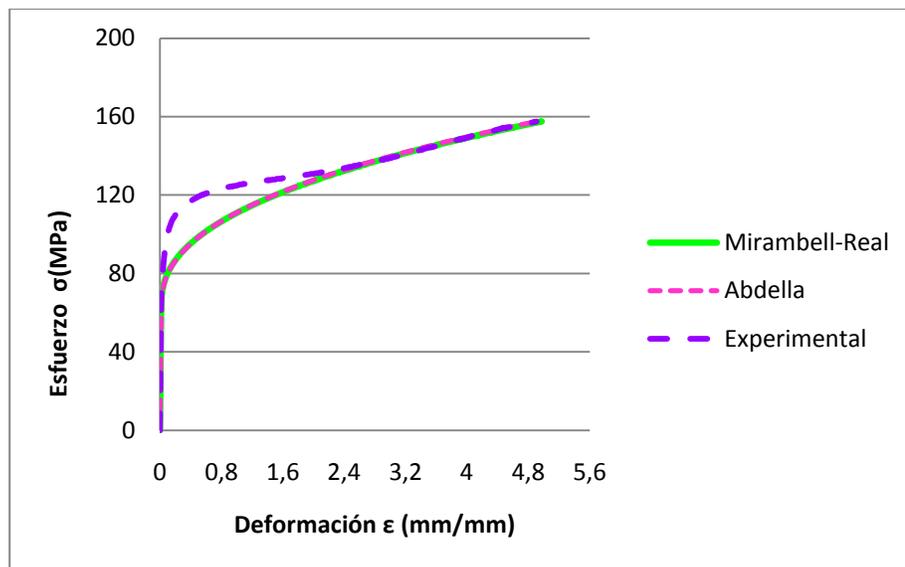
**Figura 4.40.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de torsión sin envejecimiento.



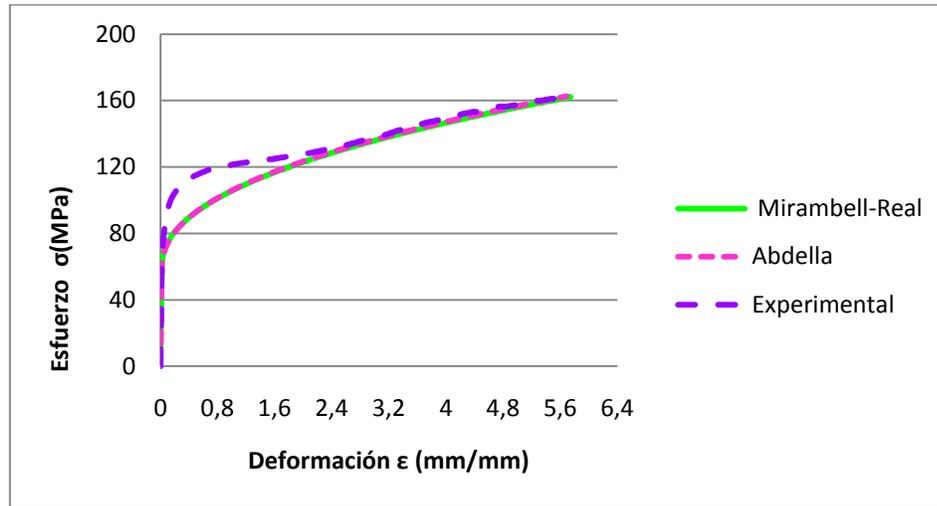
**Figura 4.41.** Curva esfuerzo vs deformación  $\epsilon$  un ensayo de torsión sin envejecimiento.



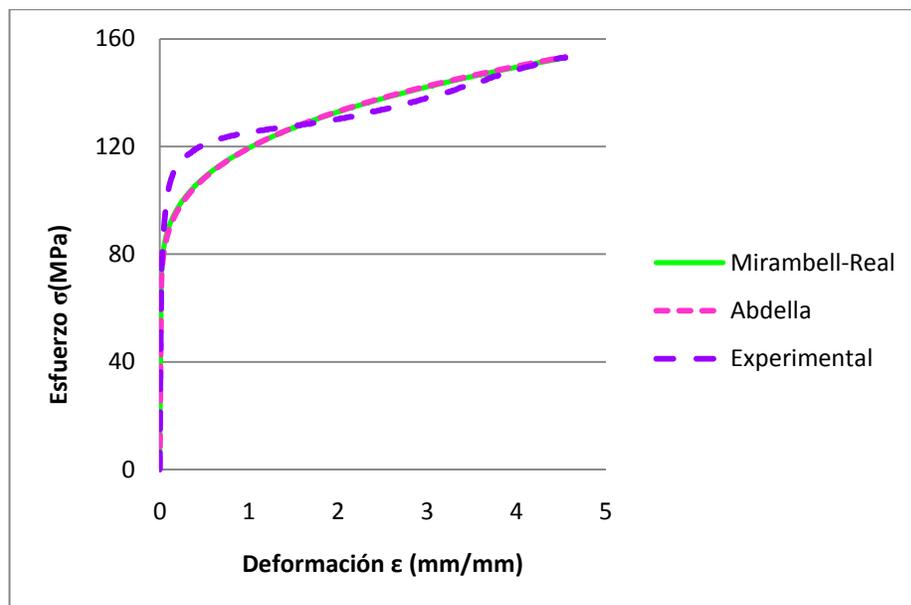
**Figura 4.42.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de torsión con envejecimiento.



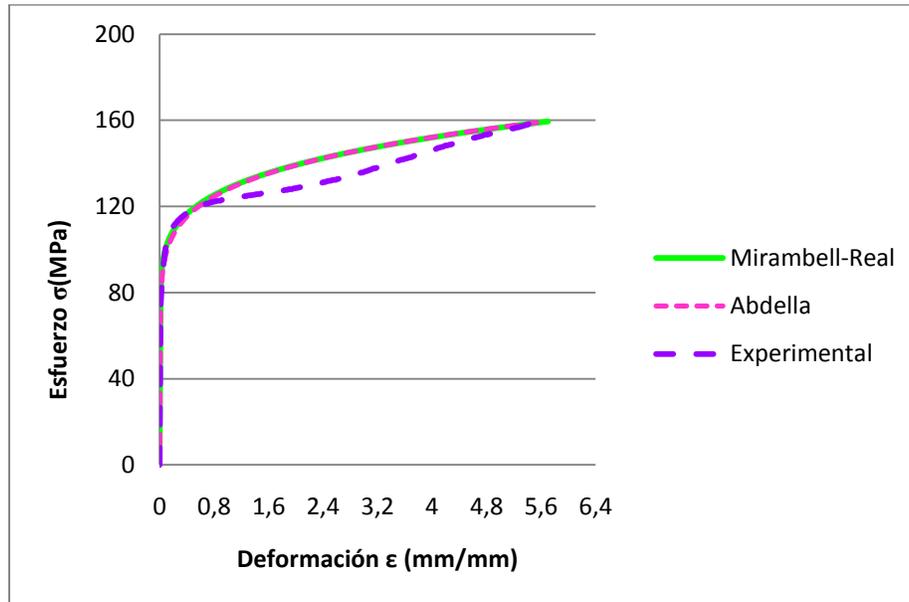
**Figura 4.43.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de torsión con envejecimiento.



**Figura 4.44.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de torsión con envejecimiento.



**Figura 4.45.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de torsión con envejecimiento.



**Figura 4.46.** Curva esfuerzo vs deformación efectiva de un ensayo de torsión con envejecimiento.

En los gráficos de los ensayos de torsión mostrados en las figuras 4.37 a 4.46 se observa que los valores tanto para Mirambell-Real como para Abdella subestiman la curva experimental en la zona del codo, generalmente en un rango de deformación de (0,17-0,25) mm/mm. Se aprecia que las curvas propuestas no se ajustan en la zona del codo o zona de transición elastoplástica, al igual que en los ensayos de tracción, debido a que Mirambell-Real y Abdella fueron inicialmente concebidos para aceros inoxidable, los cuales poseen una zona de transición elastoplástica menos marcada en comparación al material estudiado en este trabajo, es decir, la aleación de aluminio AA-6063 presenta un rango de deformación mayor en la zona de transición elastoplástica.

Por otra parte se puede observar en las figuras 4.37 a 4.46 que ocurre una inflexión en la curva esfuerzo-deformación efectiva en la zona plástica, este comportamiento se obtuvo para todos los ensayos de torsión cimiento realizados al

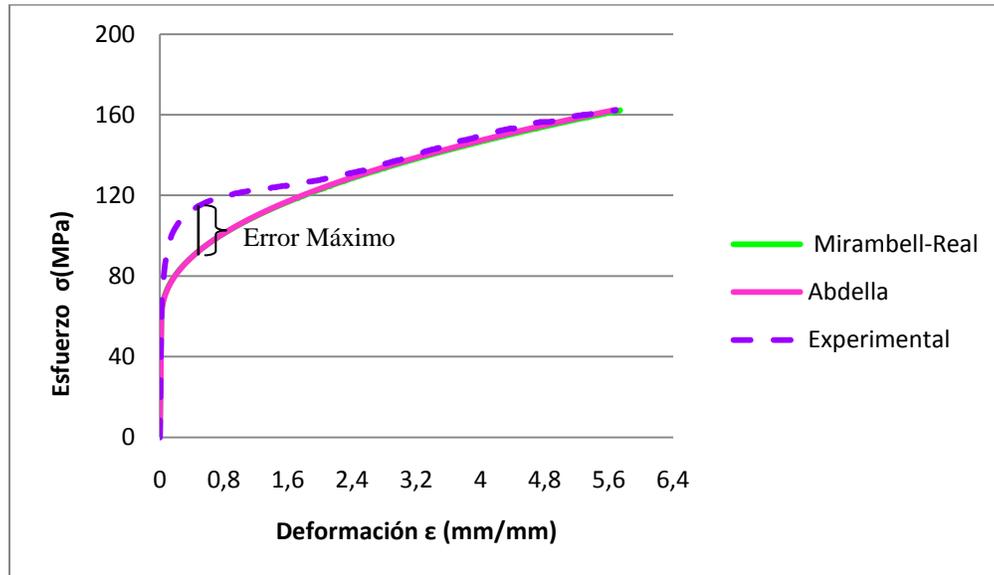


material estudiado, por lo cual se puede generalizar que este es el comportamiento a torsión de la aleación estudiada, para la mayoría de los casos el inicio de la inflexión en los ensayos sin envejecimiento es a una deformación de 1,6 mm/mm y para los ensayos con envejecimiento es a 2,4 mm/mm. Esto dificulta el ajuste de los modelos utilizados, porque dichos modelos están concebidos para un comportamiento continuo de la curva sin cambios de pendiente.

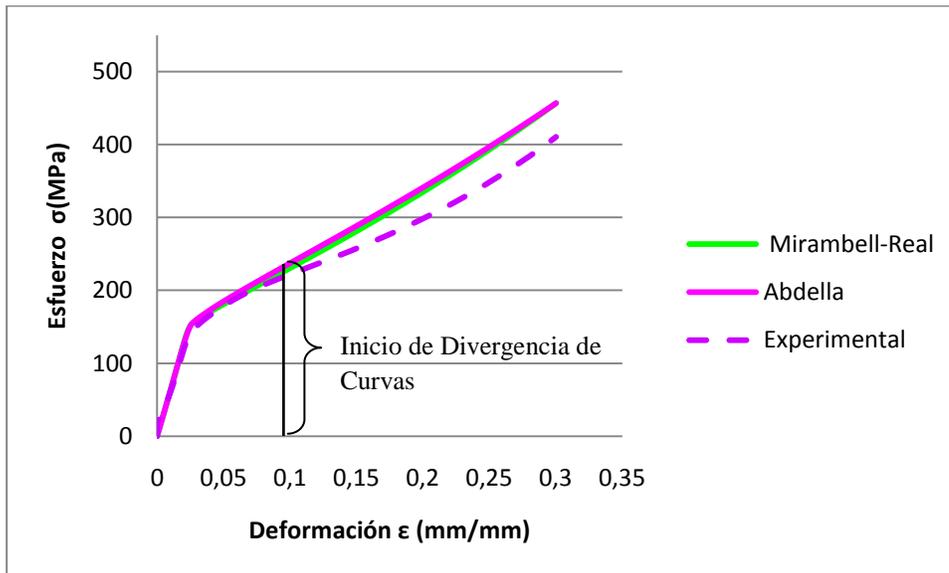
#### **4.6. ERRORES ENTRE LA CURVA EXPERIMENTAL Y LOS MODELOS DE MIRAMBELL-REAL Y ABDELLA.**

Como se pudo observar en las figuras 4.16 a 4.45, el error reportado por el modelo de Abdella supera el del modelo de Mirambell-Rea, obteniendo un error máximo en el primer caso de 23% y en el segundo de 18%. En los ensayos de compresión se aprecia que en su mayoría no se puede hablar de un error máximo sino de un punto donde comienzan a diferenciarse las curvas.

Los valores de deformación donde se presenta el error máximo y el punto donde comienza a diferenciarse la curva en los ensayos de compresión, se consiguieron como se muestra en las figuras 4.47 y 4.48.



**Figura 4.47** Valor de deformación donde el error es máximo para un ensayo de torsión.



**Figura 4.48.** Punto donde la curva comienza a diferenciarse de la experimental para un ensayo de compresión.

A continuación se muestran en la tabla 4.8, los máximos errores y los puntos de deformación donde estos se encuentran, para los modelos de Mirambell-Real y Abdella en comparación con la curva experimental; en el caso de los ensayos de



compresión en algunos casos que no presentan error sino un punto donde las curvas se diferencian.

**Tabla 4.8.** Valores de Correlación, máximos errores y puntos de deformación donde se encuentran.

	Def. en máx. Error	%Error Abdella	Def. en máx. Error	%Error Mirambell-Real	R <sup>2</sup> Mirambell-Real	R <sup>2</sup> Abdella
TR1	0,0069	19,78	0,05	4,36	0,9941	0,9809
TR2	0,0041	4,8298	0,0031	18,58	0,9970	0,9932
TR3	0,0034	15,98	0,0044	2,27	0,9978	0,9883
TR4	0,0018	1,9771	0,0026	17,23	0,9984	0,9990
TR5	0,0048	23,5329	0,003	10	0,9883	0,9681
TRE1	0,0049	2,1559	0,002	2,91	0,9947	0,9981
TRE2	0,009	6,1126	0,006	10,98	0,9911	0,9924
TRE3	0,015	4,616	0,0039	1,17	0,9873	0,9978
TRE4	0,016	2,549	0,014	4,3	0,9788	0,9962
TRE5	0,0039	16,87	0,0048	7,63	0,9954	0,9903
T1	0,1965	20,43	0,1965	19,87	0,9964	0,9880
T2	0,1721	24,83	0,1721	24,4	0,9771	0,9825
T3	0,266	4,21	0,266	3,81	0,9868	0,9935
T4	0,246	8,11	0,246	7,49	0,9437	0,9913
T5	0,2279	12,47	0,2279	12,38	0,9724	0,9769
TE1	0,2577	16,22	0,2577	15,6	0,9860	0,9802
TE2	0,247	20,64	0,247	20,7	0,9795	0,9715
TE3	0,2244	22,66	0,2244	18,29	0,9872	0,9773
TE4	0,2362	14,26	0,2362	13,73	0,9886	0,9765
TE5	2,02	8,05	2,02	7,8	0,9650	0,9899
LC1	0,032	-	0,024	-	0,9868	0,9875
LC2	0,016	-	0,062	5,95	0,9934	0,9948
LC3	0,081	-	0,081	-	0,9954	0,9967
LC4	0,015	-	0,064	3,73	0,9958	0,9902

**Tabla 4.8.** Continuación.

Def. en	%Error	Def. en	%Error	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>
---------	--------	---------	--------	----------------	----------------



	máx. Error	Abdella	máx. Error	Mirambell-Real	Mirambell-Real	Abdella
<b>LC5</b>	0,088	-	0,088	-	0,9957	0,9936
<b>LCE1</b>	0,079	-	0,105	-	0,9894	0,9897
<b>LCE2</b>	0,08	-	0,112	-	0,9920	0,9938
<b>LCE3</b>	0,023	-	0,1143	-	0,9910	0,9942
<b>LCE4</b>	0,066	10,54	0,179	11,64	0,9925	0,9926
<b>LCE5</b>	0,0852	-	0,1007	-	0,9910	0,9946



## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES

Es posible determinar las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio AA-6063, para realizar los ajustes de las ecuaciones de Ramberg-Osgood, Mirambell-Real y Abdella a partir de ensayos de tracción, torsión y compresión axial en condiciones originales y con el material envejecido, obteniendo variaciones en los resultados.

Para las condiciones de ensayo utilizadas en esta investigación, se obtuvo un coeficiente de fricción de 0,216 utilizando como lubricante bisulfuro de molibdeno.

Se obtuvieron tres ecuaciones para el exponente “m” de Mirambell-Real, con coeficientes de correlación de 93%, 91% y 91%, de acuerdo a las siguientes condiciones: una para los ensayos cuyas probetas recibieron tratamiento térmico (ecuación 4.2), otra para las probetas de compresión y torsión (ecuación 4.1), y una última para los ensayos de tracción (ecuación 4.3).

Al comparar las curvas esfuerzo-deformación efectiva según los distintos modelos estudiados, se puede concluir que estos modelos representan un mejor ajuste para el caso de los ensayos de tracción, que para torsión y compresión, ya que se obtuvo el menor error de todos los ensayos el cual fue de aproximadamente 10% y se obtuvieron coeficientes de correlación entre 97% y 99%.

Para los ensayos de compresión se obtienen mejores ajustes de los modelos de Mirambell-Real y la aproximación explícita de Abdella a la curva experimental hasta la deformación de 0,1 mm/mm en la mayoría de los casos, presentándose divergencias a partir de esta deformación.



Para la mayoría de los casos de los ensayos de torsión los modelos de Mirambell-Real y Abdella subestiman los valores experimentales en la zona del codo, arrojando errores de hasta 20%.

Entre los modelos matemáticos evaluados, el modelo de Mirambell-Real presenta un mejor ajuste a los resultados experimentales, obteniéndose un porcentaje de error inferior al obtenido con la aproximación explícita de Abdella.



## RECOMENDACIONES

Realizar más ensayos de la misma aleación, pero con diferentes condiciones como deformación en frío, otros tipos de tratamientos térmicos, entre otros, para así poder realizar una comparación sobre la influencia de esas condiciones sobre el ajuste del material.

Tomar en cuenta que las máquinas de ensayo que vayan a utilizar estén bien calibradas, para obtener buenos resultados. Y realizar los ensayos de tracción con extensómetro.

Realizar ensayos con otros tipos de aleaciones de aluminio para ver si las curvas son parecidas y si el ajuste presenta el mismo comportamiento que en la aleación AA-6063.

Hacer estudios de la curva esfuerzo-deformación en los ensayos de torsión para esta aleación, con el fin de analizar y conocer el motivo del cambio de pendiente en la zona plástica, ya que dicho cambio fue la raíz de las desviaciones en los ensayos de torsión.

## NOMENCLATURA

**$E_0$** : Módulo de Young (MPa).

**$E_{0,2}$** : Módulo tangente para 0,2% (MPa).

**$S$** : Esfuerzo nominal (MPa).

**$S_u$** : Resistencia última a tracción (MPa).

**$S_{0,2}$** : Esfuerzo de prueba para 0,2% (MPa).

**$S_{0,001}$** : Esfuerzo de prueba para 0,001% (MPa).

**$e$** : Deformación nominal (mm/mm).

**$e_u$** : Deformación última (mm/mm).

**$m$** : Coeficiente adimensional que define la forma del codo en la curva esfuerzo-deformación.

**$n$** : Exponente adimensional que define la parte lineal de la curva esfuerzo-deformación.

**$\bar{p}$** : Presión media (MPa)

**$d_0$** : Diámetro inicial (mm).

**$h_0$** : Altura inicial (mm).

**$r, r_2, p, r^*, E_u, r_u, p^*, r^*$** : Parámetros de la ecuación de Abdella (adimensionales).



## REFERENCIAS

Aluminio. (2009). [On-line]. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Aluminio>

Aluminio Aleación 6063 (al mg si 0,5). (2009). [On-line]. Disponible en: <http://www.electrocome.com/al6063.htm>.

Aparicio. G. (2010). Evaluación del Comportamiento Mecánico de la Aleación de Aluminio 3003 Proveniente de Colada Continua. Universidad Simón Bolívar. Tesis de Maestría.

Beer, F. y Johnston, E. (1993). Mecánica de materiales. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A.

Cabello, S. y Torres, M. (2006). Ensayos de compresión y torsión: una alternativa en la obtención de Curvas esfuerzo-deformación efectiva de materiales metálicos Dúctiles. X Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales IBEROMET. Cartagena de Indias, Colombia.

Chryssanthopoulos, M. y Low, Y. (2001). A method for predicting the flexural response of tubular members with non-linear stress-strain characteristics. Institute of High Performance Computing.

Ciaccia, M. Aparicio G. Tinedo R. Potenza G. y Heber D' A. (2007). Ajuste de la ecuación de Rasmussen para las aleaciones de aluminio 2024, 3003, 6061 y 6063. 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007.

Composición Química de la Aleación AA 6063/E. (2010). [On-line]. Disponible en: [http://www.alcemar.com.ar/index\\_files/aleacion\\_6063.pdf](http://www.alcemar.com.ar/index_files/aleacion_6063.pdf)



Endurecimiento. (2009). [On-line]. Disponible en:  
<http://www.utp.edu.co/~publio17/endurecimiento.htm>

Ensayo de tracción en metales. (2010). [On-line]. Disponible en:  
<http://www.monografias.com/trabajos38/traccion-en-metales/traccion-en-metales.shtml>

Hill, H. (1945). Determination of Stress-Strain Relations from Offset Yield Strength Values. NACA, T.N. N° 927.

Mata, Victor J. y Alexander. Métodos lineales y estimación por mínimos cuadrados. Caracas, Mayo 2004. [On-line]. Disponible en  
<http://www.monografias.com/metodoslineales/metodos-lineales.shtml>

Ramberg–Osgood relationship. (2010). [On-Line]. Disponible en: [www.Ramberg–Osgood\\_relationship.htm](http://www.Ramberg–Osgood_relationship.htm)

Ramberg, W y Osgood, W. (1943). Description of stress-strain curves by three parameter. NACA, T.N. N° 902.

Rasmussen. K.J.R. (2003). Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys, *Journal of Constructional Steel*, vol. 59 pp. 47–61, 2003.

Real. E, Mirambell. E. (2000). Discussion of “Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys”. Universitat Politecnica de Catalunya. Barcelona, España.

Sáenz. L. Frenza J. Leañez M. y Caralli A. (2006). Influencia del tratamiento térmico de envejecimiento sobre el comportamiento mecánico de la aleación de aluminio 6063. *Revista Ingeniería UC*. Vol. 13, N° 3, 19-25, 2006.

Torres. M. Di Gracia V. Gonzáles G. y Zurita O. (2004). Estimación del Esfuerzo de Fluencia para Materiales Laminados en Frío. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. Vol. 24, N° 2, 31-36, 2004.