



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ELASTO-PLÁSTICO DE LAS  
ALEACIONES DE ALUMINIO 1100 Y 1050 BASADOS EN LAS ECUACIONES DE  
RAMBERG-OSGOOD Y RASMUSSEN”.**

**Olarte S. Luís E.  
Velásquez A. Elian A.**

**Bárbula, Octubre del 2008.**



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ELASTO-PLÁSTICO DE LAS  
ALEACIONES DE ALUMINIO 1100 Y 1050 BASADOS EN LAS ECUACIONES DE  
RAMBERG-OSGOOD Y RASMUSSEN”.**

**Trabajo Especial de Grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para  
optar al título de Ingeniero Mecánico.**

**Olarte S. Luís E.  
Velásquez A. Elian A.**

**Bárbula, Octubre del 2008.**



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ELASTO-PLÁSTICO DE LAS  
ALEACIONES DE ALUMINIO 1100 Y 1050 BASADOS EN LAS ECUACIONES DE  
RAMBERG-OSGOOD Y RASMUSSEN”.**

**Este trabajo fue Subvencionado por el Consejo de Desarrollo Científico y  
Humanístico de la Universidad de Carabobo según oficio Nro. 1085-07 del 06-12-2007.**

**Olarte S. Luís E.  
Velásquez A. Elian A.**

**Bárbula, Octubre del 2008.**

Dedico a:

A Dios todo poderoso, ya que sin Él no sería posible.

A mis padres, Teresa y Eladio Olarte, por su apoyo incondicional, mejores consejos, sabiduría y gran esfuerzo en sacarme adelante.

A mis hermanos, tíos, primos y amigos, por estar allí siempre, brindándome su cariño y colaboración constante.

Gracias a todos.

Luís Olarte

Este trabajo quiero dedicárselo primeramente a Dios, quien con su infinito amor me ha dado las fuerzas para continuar adelante, a pesar de las adversidades.

A mis padres Brígida de Jesús y Omar Francisco quienes han sido unos padres excelentes y quienes con sus sabios consejos me han ayudado a hacer este camino más fácil de transitar.

A mi novio Rafael Gabriel quien adoptó esta tesis como suya y que me apoyó cuando más lo necesitaba.

A mis hermanos Omar José y Evelyn Andreina quienes con sus críticas y observaciones me apoyaron durante la realización de ese trabajo de grado.

Los quiero muchísimo.

Elían Antone

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos aquellos que nos han alentado para la realización de este trabajo de investigación, quienes nos han favorecido con sus observaciones veraces, especialmente a nuestra tutora **Ing. Gennifer Aparicio** por su paciencia y dedicación y al **Ing. Marco Ciaccia** quien nos ha guiado durante la realización de este trabajo de investigación.

A las empresas “INDALVEN C.A”, “INMEVAL C.A” y “CONAL PHELPS DODGE C.A”, quienes nos facilitaron el material con el que desarrollamos nuestra investigación.

Al Laboratorio de Ensayos Mecánicos de Materiales de la Universidad Simón Bolívar por permitir la realización de los ensayos de tracción en sus instalaciones.

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo por financiar la ejecución de este trabajo de grado.

Igualmente a todas aquellas personas que de alguna u otra forma contribuyeron a que este trabajo fuese posible porque en su momento nos brindaron el apoyo necesario para seguir adelante, nuestros compañeros, amigos, familiares, muchísimas gracias a todos.



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**DPTO. DE MATERIALES Y PROCESOS**  
**DE FABRICACIÓN**



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ELASTO-PLÁSTICO DE LAS**  
**ALEACIONES DE ALUMINIO 1100 Y 1050 BASADOS EN LAS ECUACIONES DE**  
**RAMBERG-OSGOOD Y RASMUSSEN**

**Olarte L. <sup>(1)</sup>, Velásquez E. <sup>(1)</sup>, Aparicio G. <sup>(1)</sup>, Ciaccia M. <sup>(1)</sup>**

**<sup>(1)</sup> Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Carabobo, Naguanagua Venezuela**

**RESUMEN**

El aluminio es el metal más utilizado en la industria venezolana después del acero, por lo que es indispensable conocer su comportamiento elastoplástico para estimar como puede verse afectado el material por los numerosos factores que puede estar sometido en sus procesos de conformado y aplicaciones industriales. En este trabajo se evalúa el comportamiento elastoplástico para diferentes aleaciones de la serie 1000, partiendo de sus curvas esfuerzo-deformación y utilizando las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen. Las curvas utilizadas para el ajuste fueron obtenidas de ensayos experimentales y revisión bibliográfica (AA-1100, AA-1050 y AA-1350) para un total de 25 probetas, adicionalmente se utilizaron 4 probetas para validar los ajustes (AA-1050). Los parámetros se ajustaron utilizando el método de los mínimos cuadrados lineal y no lineal. Se obtuvo que los ajustes para el exponente  $m$  de Rasmussen presenta un coeficiente de correlación de 76% para las aleaciones AA-1100 y AA-1350; al validar dicho ajuste con la aleación AA-1050 se observa mucha divergencia entre la curva propuesta y la curva obtenida de la ecuación ajustada, por lo que fue necesario hallar una ecuación del parámetro  $m$  independiente para la aleación AA-1050. Las correlaciones para esfuerzo y deformación última,  $S_u$  y  $e_u$  proporcionan un error máximo de 50% y de 25% respectivamente, para las aleaciones AA-1100 y AA-1350 y al realizar la validación con la aleación AA-1050 se presentan errores con magnitudes de 53% para el  $S_u$  y 90% para  $e_u$ , por lo que también fue necesario hallar correlaciones independientes para esta aleación las cuales arrojaron un error máximo del 27% para el  $S_u$  y 90% para  $e_u$  lo indica que no fue posible ajustar este último parámetro para la aleación AA-1050.

**PALABRAS CLAVES:** Comportamiento elastoplástico, ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen, aleaciones de aluminio.

## UNIDADES Y NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción
$e$	Deformación nominal (mm/mm)
$S$	Esfuerzo nominal (MPa)
$E_0$	Módulo de Young
$S_{0,2}$	Esfuerzo de fluencia del material para una deformación de 0,2% (MPa)
$n$	Parámetro independiente
$S_{0,01}$	Esfuerzo de fluencia del material para una deformación de 0,01% (MPa)
$i, j$ y $k$	Parámetro dependiente del espesor del material ensayado
$\sigma$	Esfuerzo real
$t$	Espesor (mm)
$T. F.$	Trabajo en frío (%)
$S_u$	Resistencia última a la tracción (MPa)
$e_u$	Deformación última (mm/mm)
$\bar{e}_{up}$	Deformación plástica última transformada (mm/mm)
$E_{0,2}$	Módulo tangente para 0,2% (MPa)
$l$	Longitud (mm)
$m$	Parámetro independiente de Rasmussen



---

## ÍNDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS	xii
INDICE DE FIGURAS	xiii
INTRODUCCIÓN	15
<b>CAPÍTULO I “EL PROBLEMA“</b>	17
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	20
1.2.1. Objetivo General	20
1.2.2. Objetivos Específicos	20
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	20
1.4. LIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	21
1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	20
<b>CAPÍTULO II “MARCO TEÓRICO”</b>	22
2.1. ANTECEDENTES	22
2.2. BASES TEÓRICAS	31
2.3. AJUSTES	36
2.3.1 Ajuste por mínimos cuadrados	36
2.3.2 Ajuste por mínimos cuadrados lineal	36
2.3.3 Ajuste por mínimos cuadrados no lineal	38
2.3.4 Coeficiente de correlación	41
<b>CAPÍTULO III “MARCO METODOLÓGICO”</b>	43
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	43
3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN	43
3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	44
3.3.1 Revisión bibliográfica	44
3.3.2 Búsqueda de las aleaciones en estudio	44
3.3.3 Aprendizaje del uso y manejo de los equipos de laboratorio	44



---

3.3.4 Elaboración de las probetas	45
3.3.5 Realización de los ensayos a tracción	45
3.3.6 Aprendizaje del uso y manejo de programas	45
3.3.7 Obtención de los parámetros de las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen	45
3.3.8 Verificación de los parámetros de las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen	45
3.4. PROCEDENCIA Y CARACTERÍSTICAS ORIGINALES DEL MATERIAL	46
3.5. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO	47
3.6. PREPARACIÓN DE PROBETAS	47
3.6.1 Probetas planas	47
3.6.2 Probetas cilíndricas	48
3.7. ENSAYOS DE TRACCIÓN	48
3.7.1 Ensayos de tracción de láminas planas	48
3.7.2 Ensayos de tracción de barras cilíndricas	49
3.8. POBLACIÓN Y MUESTRA	49
3.8.1 Curvas carga-alargamiento de la literatura	49
3.8.2 Curvas carga-alargamiento obtenidas de ensayos	49
3.8.3 Nomenclatura de las curvas obtenidas de la literatura y de la validación	50
3.8.3.1 Nomenclatura de las probetas planas	50
3.8.3.2 Nomenclatura de las probetas cilíndricas	51
3.9. AJUSTE DE PARÁMETROS	52
<b>CAPÍTULO IV “RESULTADOS OBTENIDOS”</b>	<b>56</b>

---



---

4.1. RESULTADOS	56
4.1.1 Resultados del ajuste de los parámetros de las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen	56
4.1.2 Validación de resultados	60
4.1.3 Determinación de las correlaciones de la deformación última y esfuerzo último	64
<b>CAPÍTULO V “ANÁLISIS DE RESULTADOS”</b>	70
<b>CONCLUSIONES</b>	76
<b>RECOMENDACIONES</b>	78
<b>REFERENCIAS</b>	79
<b>APÉNDICE</b>	81



---

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.-</b> Designación de las aleaciones de aluminio según Aluminium Association	33
<b>Tabla 2.2.-</b> Grados de templados para las aleaciones de aluminio	35
<b>Tabla 2.3.-</b> Clasificación según grado de coeficiente de correlación	41
<b>Tabla 3.1.-</b> Composición química del aluminio AA-1100 utilizado	47
<b>Tabla 3.2.-</b> Composición química del aluminio AA-1050 utilizado	47
<b>Tabla 3.3.-</b> Composición química del aluminio AA-1350 utilizado	47
<b>Tabla 3.4.-</b> Aleaciones obtenidas de la literatura	49
<b>Tabla 3.5.-</b> Probetas a ensayadas de las diferentes aleaciones	50
<b>Tabla 3.6.-</b> Ejemplo de la tabulación de los parámetros para definir la ecuación de Rasmussen	53
<b>Tabla 4.1.-</b> Parámetros de la ecuación de Rasmussen de las probetas ensayadas	56
<b>Tabla 4.2.-</b> Valores de $m$ ajustados	57
<b>Tabla 4.3.-</b> Parámetros de la ecuación de Rasmussen para la aleación AA-1050	60
<b>Tabla 4.4.-</b> Valores de $m$ determinados según la ecuación 4.1 para la AA-1050	61
<b>Tabla 4.5.-</b> Valores de $m$ ajustados solo para AA-1050	63
<b>Tabla 4.6.-</b> Valores de los parámetros de las correlaciones determinados para cada probeta ensayada	65



---

**ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 2.1.-</b> Método de compensación “Offset”	23
<b>Figura 2.2.-</b> Curvas esfuerzo - deformación (a) zona elastica, (b) zona plástica	26
<b>Figura 2.3.-</b> Pendiente del esfuerzo de fluencia	28
<b>Figura 2.4.-</b> Prueba con los parámetros de Rasmussen	29
<b>Figura 3.1.-</b> Probeta tipo sheet según norma ASTM E-8M	48
<b>Figura 3.2.-</b> Probeta cilíndrica de 200mm de longitud según la norma ASTM B557M	48
<b>Figura 3.3.-</b> Método Offset aplicado a la curva esfuerzo deformación	54
<b>Figura 4.1.-</b> Ajuste por mínimos cuadrados lineal de $m$ apartir de las AA-1100 y AA-1350	57
<b>Figura 4.2.-</b> Curvas esfuerzo - deformación ingenieril propuestas y experimentales de AA-1100-HO-0-88,33-0,7-1	58
<b>Figura 4.3.-</b> Curvas esfuerzo - deformación ingenieril propuestas y experimentales de AA-1100-HO-90-58,33-2,5-1	59
<b>Figura 4.4.-</b> Curvas esfuerzo - deformación ingenieril propuestas y experimentales de AA-1350-H14-0-96,68-3	59
<b>Figura 4.5.-</b> Curvas esfuerzo - deformación ingenieril propuestas y experimentales de AA-1350-H14-0-96,68-4	60
<b>Figura 4.6.-</b> Curvas esfuerzo - deformación ingenieril propuestas y Experimentales de AA-1050N-0-91,67-0,5	61
<b>Figura 4.7.-</b> Curvas esfuerzo de formación ingenieril propuestas y Experimentales AA-1050N-0-91,67-0,5	62
<b>Figura 4.8.-</b> Curvas esfuerzo de formación ingenieril propuestas y Experimentales AA-1050-T-50-1	62
<b>Figura 4.9.-</b> Curvas esfuerzo de formación ingenieril propuestas y Experimentales AA-1050-T-50-2	63

---



---

<b>Figura 4.10.-</b> Ajuste por mínimos cuadrados lineal de $m$ de la aleación AA-1050	64
<b>Figura 4.11.-</b> Ajuste lineal para esfuerzo ultimo $S_u$	66
<b>Figura 4.12.-</b> Ajuste lineal para deformación ultima $e_u$	67
<b>Figura 4.13.-</b> Ajuste lineal para esfuerzo ultimo $S_u$ AA-1050	68
<b>Figura 4.14.-</b> Ajuste lineal para deformación ultima $e_u$ AA-1050	69
<b>Figura 5.1.-</b> Comparación del esfuerzo ultimo propuesto y experimental para aleaciones AA-1100 y AA-1350	72
<b>Figura 5.2.-</b> Comparación de la correlación $S_u$ propuesto general y experimental para la aleación AA-1050	72
<b>Figura 5.3.-</b> Comparación la deformación ultima propuesta y experimental para aleaciones AA-1100 y AA-1350	73
<b>Figura 5.4.-</b> Curva de validación la deformación ultima propuesta y experimental para la AA-1050	74
<b>Figura 5.5.-</b> Comparación entre el esfuerzo último propuesto y experimental para la AA-1050	74
<b>Figura 5.6.-</b> Comparación entre la deformación última propuesta y experimental para la AA-1050	75

## INTRODUCCIÓN

La presente obra se destina como Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico ante la ilustre Universidad de Carabobo. Se ha elaborado con el fin de incentivar el estudio del comportamiento elastoplástico del aluminio, el cual es uno de los metales más empleados en la actualidad en la industria venezolana.

Para evaluar el comportamiento elasto-plástico de este metal se va a hacer uso de las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen, ajustando sus parámetros a partir de las curvas esfuerzo-deformación de las aleaciones en estudio.

El trabajo de investigación se ha dividido en cinco capítulos. El capítulo I titulado “El Problema” es una parte fundamental del trabajo pues nos permite iniciarlo de una forma organizada y gradual, aquí se exponen puntos como Planteamiento del Problema que es el enfoque inicial que argumenta la realización de dicha investigación; objetivos, general y específicos, que son las metas que se pretenden lograr con este trabajo de grado.

El Capítulo II “Marco Teórico” constituye las bases teóricas de la investigación, aquí se presentan los conocimientos e investigaciones previas que se deben poseer antes de abordar los fenómenos ligados al problema que genera este trabajo de investigación.

El Capítulo III constituye el marco metodológico del trabajo, aquí se definen los pasos a seguir para lograr los objetivos planteados, empleando una investigación metodológica de tipo Documental y Experimental obteniendo un estudio de nivel descriptivo puesto que se está partiendo de un modelo teórico ya definido; ésta investigación puede verse como una herramienta muy valiosa en el análisis de

procesos de conformado de aluminio de la serie 1000, sin embargo, es lógico y comprensible que se generen variaciones y alteraciones de la ecuación original puesto que el ajuste se está realizando de forma experimental.

Los Capítulos IV y V muestran los resultados obtenidos y el análisis de los mismos.

Se espera con ésta investigación, de ser posible, obtener un ajuste general de los parámetros de las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen para las aleaciones de aluminio estudiadas y que ésta expresión se use como un modelo matemático para predecir la forma de la curva esfuerzo-deformación en dichas aleaciones y con ello contribuir al análisis de procesos de conformado de este material.



---

## CAPÍTULO I

### EL PROBLEMA.

#### 1.1 Planteamiento del Problema

El aluminio es un metal que reúne una serie de propiedades mecánicas excelentes dentro del grupo de los metales no féreos, de ahí su elevado uso en la industria. También es abundante en la naturaleza; además cuando se habla de este material se tienen en cuenta todas sus aleaciones, las cuales satisfacen como ninguna otra las actuales demandas debido a que posee características particulares que lo hacen ideal para muchas aplicaciones, tales como: elevada proporción peso-resistencia, buena resistencia mecánica, elevada conductividad térmica, fácil mecanizado y es un metal fácil y económico de reciclar.

En la actualidad existe una amplia gama de aleaciones de aluminio que proporcionan al metal más fuerza y resistencia a altas temperaturas y a la corrosión. Las aleaciones de aluminio más comunes comercialmente (designadas por la Aluminium Association) y utilizadas en la industria venezolana son:

- 1100, donde el aluminio es puro en casi un 99%.
- 1050, donde el aluminio es natural con un alto grado de pureza.
- 3003, donde el principal elemento aleante es el manganeso.
- 8011, donde los principales elementos aleantes son el hierro y el silicio.

Estas aleaciones generalmente se procesan a través del conformado del material por lo que se deforman permanentemente, produciendo un endurecimiento por deformación, por lo que se hace necesario conocer el comportamiento elastoplástico



---

de dichas aleaciones, usando expresiones que relacionen los esfuerzos con las deformaciones y que definan la curva esfuerzo–deformación en el intervalo plástico.

Con este trabajo de grado se pretende modelar dicho comportamiento específicamente para las aleaciones de aluminio de la serie 1000 puesto que las 2 últimas aleaciones mencionadas anteriormente, fueron evaluadas en un trabajo de grado anterior a éste.

En lo concerniente a los modelos a utilizar, el modelo de *Ramberg-Osgood, 1943*, es una ecuación de tres parámetros para expresar la relación entre el esfuerzo y la deformación para valores de los esfuerzos ligeramente mayores al esfuerzo de fluencia del material, dicha relación se muestra a continuación:

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

donde  $S$  y  $e$  son los esfuerzos ingenieril y la deformación ingenieril respectivamente,  $E_0$  es el módulo de elasticidad del material y  $S_{0,2}$  es el esfuerzo a la fluencia para una deformación del 0,2%.

El parámetro  $n$  puede ser evaluado mediante el uso de 2 esfuerzos determinados mediante el Método Offset, y es de práctica común utilizar 0,01% y el 0,2%.

Posteriormente *Rasmussen, 2002*, propuso una expresión hasta el esfuerzo máximo para aceros inoxidables, tomando como base la ecuación de Ramberg-Osgood. Rasmussen indica que la ecuación de Ramberg-Osgood usada en el intervalo elástico cumple con los parámetros esperados y no necesita ningún ajuste para ser usada en aleaciones de acero inoxidable, pero al extenderse el uso de dicha ecuación



hasta el esfuerzo máximo, llega a ser poco precisa sobre todo en el caso de aleaciones con un pronunciado endurecimiento por deformación.

Por todo lo antes descrito Rasmussen propone su ecuación con la finalidad de describir el comportamiento esfuerzo - deformación en dos etapas: hasta el esfuerzo de fluencia con la ecuación de Ramberg-Osgood y desde este punto y hasta el esfuerzo último con la ecuación siguiente:

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

Donde:  $E_{0,2}$  es el Módulo de elasticidad para una deformación de 0,2%,  $e_u$  es la deformación última,  $S_u$  es el Esfuerzo último,  $e_{0,2}$  es la deformación para el punto de fluencia y  $m$  es el parámetro del cual depende la forma de la curva.

Por tanto, se pretende utilizar ésta ecuación y la de Ramberg-Osgood para predecir el comportamiento elastoplástico en aleaciones de aluminio de la serie 1000 realizando los ajustes de parámetros pertinentes, tomando datos de ensayos experimentales y de diferentes fuentes bibliográficas para las aleaciones de aluminio 1100 y 1050.

Se espera con esta investigación, de ser posible, obtener un ajuste general de los parámetros de las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen para las aleaciones de aluminio estudiadas y que esta expresión se use como un modelo matemático para predecir la forma de la curva esfuerzo-deformación en dichas aleaciones de aluminio, y con ello contribuir al análisis de procesos de conformado de este material.



## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Evaluar el comportamiento elastoplástico de las aleaciones de aluminio 1100 y 1050 basados en las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Ajustar los parámetros de las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen en aleaciones de aluminio de la serie 1000 a partir de los datos obtenidos experimentalmente y de la literatura.
- Determinar el coeficiente de correlación existente entre los modelos teóricos los datos de los ensayos utilizados para el ajuste.
- Comparar el modelo obtenido con la data de ensayos experimentales realizado a una aleación de aluminio diferente a la utilizada para el ajuste.
- Determinar correlaciones para determinar la deformación última y el esfuerzo último en función de los parámetros de la ecuación de Ramberg-Osgood.

## **1.3 Justificación**

Actualmente se hace indispensable el conocimiento de las propiedades mecánicas y el comportamiento a fluencia de las aleaciones de aluminio, debido a las múltiples aplicaciones industriales a las que están ligadas, donde son sometidos a distintos procesos de fabricación, al predecir el comportamiento elastoplástico de la aleación es posible estimar el endurecimiento que experimenta el material y de esta forma contribuir con el ajuste de su proceso de fabricación.

Las aleaciones 1100 y 1050 son muy utilizadas en la industria y con este trabajo

---



de grado se pretende obtener una expresión sencilla que pueda aproximar la forma de la curva esfuerzo-deformación para éstas aleaciones. Además, ésta ecuación puede ser la base de futuras investigaciones que se relacionen con el conformado de metales.

#### **1.4 Limitaciones**

- Disponibilidad restringida del material a estudiar (láminas de aluminio 1100 y 1050).
- Acceso limitado al laboratorio de materiales.
- Disponibilidad humana y de tiempo para realizar todas las actividades programadas dentro del laboratorio.
- Que los equipos requeridos funcionen adecuadamente.

#### **1.5 Delimitación**

- Se utilizarán un máximo de 3 aleaciones, 2 para el ajuste y una aleación para comparación, la cual pudiera ser obtenida de la literatura; además se obtendrán los parámetros generales de las ecuaciones a estudiar para todas las aleaciones de aluminio de ser posible o los parámetros independientes para cada aleación en estudio, lo cual dependerá de los valores arrojados por el coeficiente de correlación.
- La cantidad de probetas a mecanizar dependerá del material adquirido.



---

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO.

#### 2.1 ANTECEDENTES

Ramberg y Osgood (1943) desarrollaron una expresión que describe la curva esfuerzo – deformación en función de tres parámetros, según la *Ecuación 2.1*.

$$e = \frac{S}{E} + K \left( \frac{S}{E} \right)^n \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde  $S$  es el esfuerzo,  $e$  la deformación producto del esfuerzo,  $E$  es la pendiente de la zona elástica lineal,  $K$  y  $n$  constantes de la ecuación.[13]

Para obtener los parámetros, Ramberg y Osgood determinaron en primera instancia el valor  $E$  de una curva esfuerzo-deformación, luego para conseguir los parámetros restantes, trazaron dos rectas secantes sobre la curva, una con 70% de la pendiente elástica  $E$  y la segunda al 85%; lo que se resume en dos secantes  $0,7E$  y  $0,85E$ ; con estas dos rectas se determinan valores de esfuerzos  $S$  y deformaciones  $e$  quedando por resolver un sistema de ecuaciones con dos incógnitas  $K$  y  $n$  en dos ecuaciones dadas por las secantes  $0,7E$  y  $0,85E$ .

Posteriormente *Hill* (1945) hace una modificación de la ecuación de Ramberg-Osgood para aleaciones de aluminio, a partir de la cual desarrolla otra forma de determinar el parámetro  $n$  a través de la *Ecuación 2.2* mostrada a continuación:

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln(S_{0,2} / S_{0,01})} \quad \text{Ecuación 2.2}$$



Al usar el método de compensación “offset” el cual consiste en intersectar dos rectas paralelas a la pendiente elástica  $E_0$  al 0.01% y 0.2% de deformación *Figura 2.1*, obtuvo los puntos para resolver el sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas que definen el parámetro  $n$ , la expresión hallada es la *Ecuación 2.3*. [8]

$$e = \frac{S}{E_0} + 0,002 \left( \frac{S}{S_{0,2}} \right)^n \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde  $S$  y  $e$  son el esfuerzo y la deformación ingenieril,  $E_0$  es la pendiente de la zona elástica lineal y  $S_{0,2}$  es el esfuerzo de prueba para la deformación según el método “offset” del 0.2% del esfuerzo prueba.

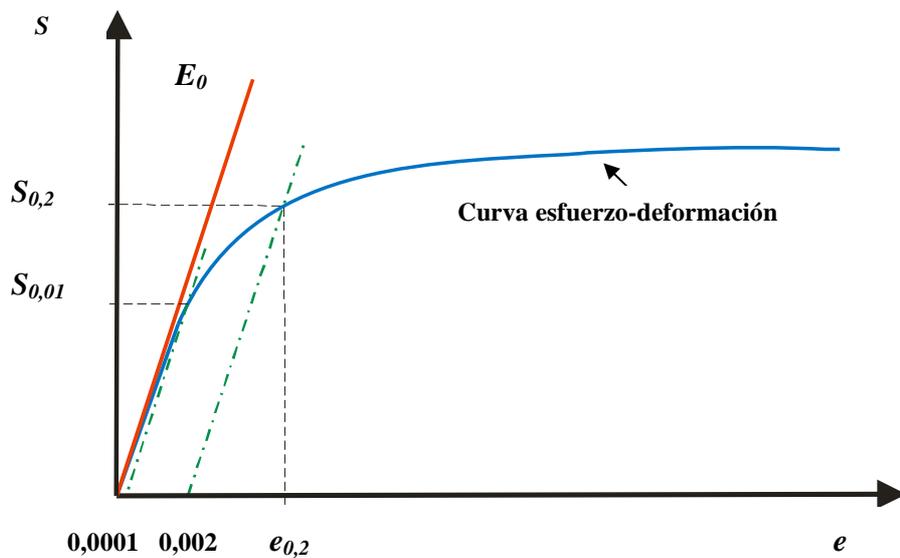


Figura 2.1 Método de compensación “offset”.

*Mc Donald* (2000) plantea una de las referencias más importantes por la exactitud de sus resultados en la descripción de la curva esfuerzo-deformación ingenieril, obteniendo la *Ecuación 2.4* para columnas a tracción. [9]



---

$$e = \frac{S}{E_0} + 0,002 \left( \frac{S}{S_1} \right)^{i+j \left( \frac{S}{S_1} \right)^k} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

donde  $e$  y  $S$  representan el esfuerzo y la deformación respectivamente,  $E_0$  el módulo de Young,  $S_1$  el esfuerzo al 0,2% de la deformación;  $i, j, k$  son constantes que dependen del espesor del material ensayado.

La ecuación de *McDonald* presenta buen ajuste pero es limitada en la aplicación, ya que sólo funciona en aceros Austenítico (AISI304).

*Olsson* (2006) estudió modelos avanzados en plasticidad en aleaciones de acero inoxidable y halló una manera de determinar la curva de esfuerzo-deformación en metales a través de su investigación, para ello realizó un gran número de ensayos en probetas cargadas uniaxial y biaxialmente. Graficó las curvas esfuerzo - deformación como esfuerzo verdadero contra deformación ingenieril y observó experimentalmente que la curva esfuerzo-deformación se acercaba a una línea recta para grandes deformaciones. [11]

Propuso que la curva esfuerzo verdadero contra deformación ingenieril se puede aproximar con la ecuación de Ramberg-Osgood hasta una deformación del 2%, y con una línea recta desde este punto en adelante. La línea recta se obtiene como un ajuste promedio de la curva esfuerzo-deformación y la ecuación utilizada por *Olsson* es la siguiente:

$$\sigma^t = \sigma_u (1 + e) \quad \text{Ecuación 2.5}$$

*Olsson* asigna  $\sigma$  para representar el esfuerzo real o también llamado esfuerzo



verdadero,  $S$  el esfuerzo ingenieril en el punto y  $e$  es la deformación ingenieril.

Rasmussen (2002) [14] propone que la ecuación de Ramberg-Osgood modificada por Hill (1945) usada en el rango elástico cumple con los parámetros esperados y no necesita ningún ajuste para ser usada en aleaciones de acero inoxidable y por tanto se puede seguir usando la *Ecuación 2.3* para el rango elástico y el parámetro  $n$  es hallado mediante el método “offset” *Ecuación 2.2* usado por Hill.

Al extenderse el uso de dicha ecuación hasta el esfuerzo máximo, es poco precisa, sobre todo en el caso de aleaciones con un pronunciado endurecimiento por deformación. Esto motiva a Rasmussen a proponer un sistema de ecuaciones con la finalidad de describir el comportamiento de la curva esfuerzo-deformación desde  $S_{0,2}$  hasta  $S_u$  tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

Esto implica que la curva esfuerzo-deformación se puede determinar con la expresión de Ramberg-Osgood (1943) hasta esfuerzos de 0.2% del esfuerzo prueba.

En el rango de esfuerzos entre la 0.2% y el esfuerzo último  $S_u$  del esfuerzo prueba, la curva de esfuerzo-deformación será definida en términos de un mínimo de parámetros adicionales.

Al observar la forma tan similar de la primera etapa (zona elástica), comparada a la forma de la curva en la segunda etapa (zona plástica), Rasmussen tomó como base la ecuación usada por Hill (1945).

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

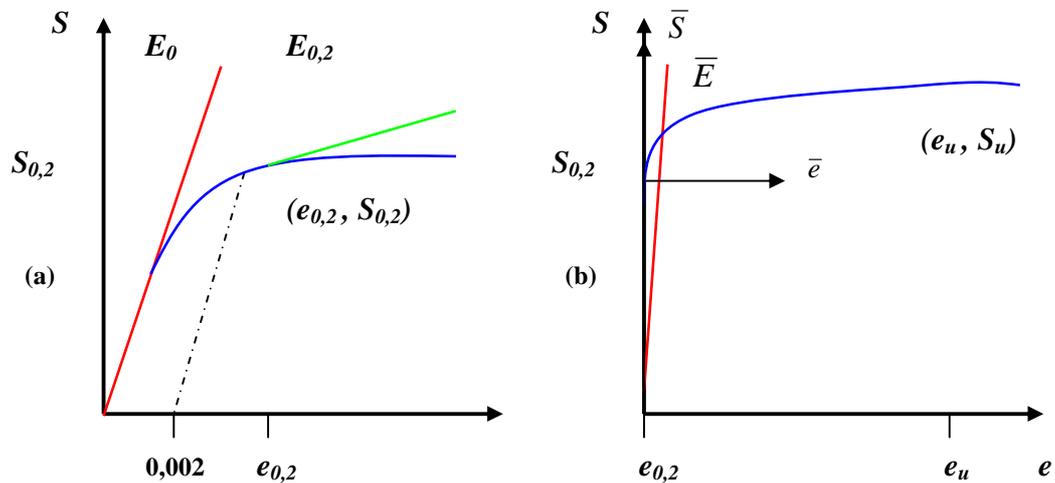


Figura 2.2 Curvas esfuerzo - deformación (a) Zona elástica, (b) Zona plástica

El desarrollo completo del modelo de Rasmussen se muestra en la *Figura 2.2*. En la *Figura 2.2(a)* se observa el comportamiento de la curva esfuerzo-deformación en la parte elástica y en la *Figura 2.2(b)* el comportamiento en la parte plástica, a partir de esto se obtuvo la nueva formulación para el rango plástico cuya expresión es la siguiente:

$$\bar{e} = \frac{\bar{S}}{E_{0,2}} + \bar{e}_{up} \left( \frac{\bar{S}}{S_u} \right)^m \quad \text{para } S \geq S_{0,2} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde:

$$\bar{e} = e - e_{0,2} \quad \text{y} \quad \bar{S} = S - S_{0,2} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

El esfuerzo último  $S_u$  queda expresado como:



---

$$\bar{S}_u = S_u - S_{0,2} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Como  $E_{0,2}$  representa el valor de la tangente a la curva esfuerzo - deformación en el punto de fluencia y como se debe mantener la continuidad de la curva, este punto es parte de la ecuación Ramberg-Osgood, y se determina por medio de su derivada

$\left. \frac{dS}{d\varepsilon} \right|_{S=S_{0,2}} = E_{0,2}$  dando como resultado la siguiente ecuación:

$$E_{0,2} = \frac{1}{E_0 + 0,002 \left( \frac{n}{S_{0,2}} \right)} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

El parámetro  $e_{0,2}$  es la deformación al esfuerzo de  $S_{0,2}$ , la cual se puede obtener de la geometría de la curva esfuerzo - deformación como se muestra en la *Figura 2.3*, a partir de la *Ecuación 2.11*.

$$e_{0,2} = \frac{S_{0,2}}{E_0} + 0,002 \quad \text{Ecuación 2.11}$$

La deformación plástica última transformada  $\bar{e}_{up}$  se obtiene según la *Ecuación 2.12*. 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  $\bar{e}_{up} \approx e_u$ .

$$\bar{e}_{up} = e_u - e_{0,2} - \frac{S_u}{E_0} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

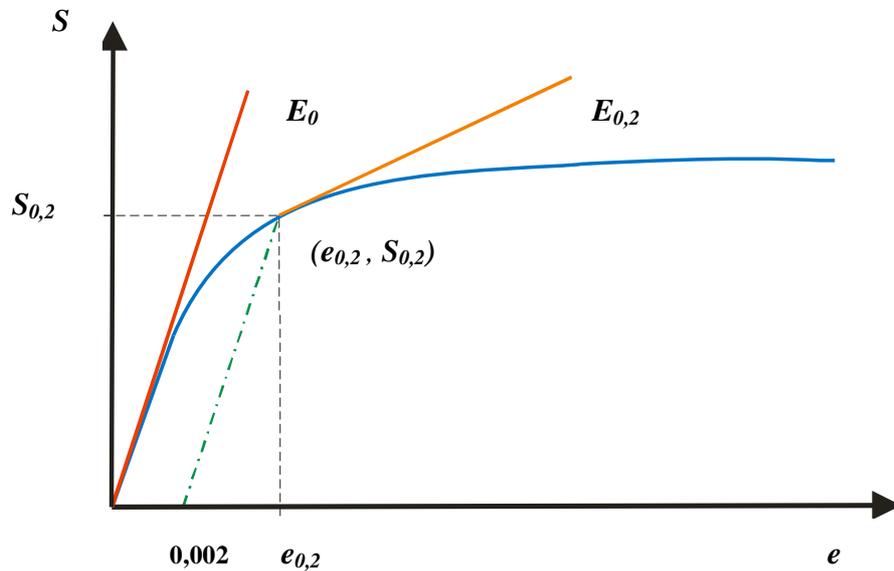


Figura 2.3 Pendiente del esfuerzo de fluencia

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 siguiente ecuación.

$$m = 1 + 3,5 \left( \frac{S_{0,2}}{S_u} \right) \quad \text{Ecuación 2.13}$$

La ecuación final de Rasmussen para esfuerzos mayores de  $S_{0,2}$  queda según la formulación planteada en la Ecuación 2.14.

$$e = \frac{S - S_{0,2}}{E_{0,2}} + e_u \left( \frac{S - S_{0,2}}{S_u - S_{0,2}} \right)^m + e_{0,2} \quad \text{para } S \geq S_{0,2} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

En resumen, según Rasmussen la curva esfuerzo - deformación queda expresada:



$$\begin{cases} e = \frac{S}{E_0} + 0.002 \left( \frac{S}{S_{0,2}} \right)^n & \Rightarrow S \leq S_{0,2} \\ e = \frac{S - S_{0,2}}{E_{0,2}} + e_u \left( \frac{S - S_{0,2}}{S_u - S_{0,2}} \right)^m + e_{0,2} & \Rightarrow S \geq S_{0,2} \end{cases} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Las pruebas gráficas obtenidas de la comparación de la ecuación de Ramberg-Osgood y los resultados de Rasmussen se observa en la *Figura 2.4*, esta diferencia de las curvas es debido a que la ecuación de Rasmussen tiene dos parámetros adicionales.

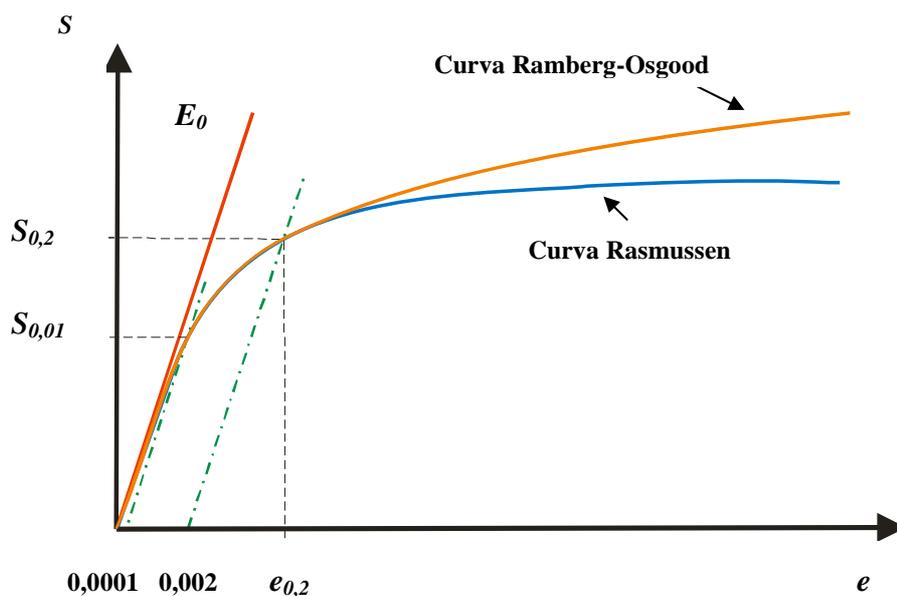


Figura 2.4 Prueba con los parámetros de Rasmussen.

El modelo planteado por Rasmussen del parámetro  $m$  también fue propuesto independientemente por Real y Mirambell en el año 2003 [15], introduciendo una corrección para la *Ecuación 2.12*, la cual según este modelo debería tener la expresión siguiente:



---

$$\bar{e}_{up} = e_u - e_{0,2} - \frac{S_u - S_{0,2}}{E_{0,2}} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

Posteriormente *Abdella* (2006) 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 para compresión. [1]

*Ciaccia et al.* (2006) determinaron los parámetros de las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen para las aleaciones de aluminio 8011 y 3003, obteniendo una buena aproximación en la zona plástica de las curvas esfuerzo-deformación, a partir de la ecuación ajustada de  $m$  y realizando los ajustes de los parámetros a través de ensayos de tracción realizados a dichas de aluminio. [5]

Consecutivamente *Ciaccia et al.* (2006) presentaron un estudio del comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A 569, comparando las curvas obtenidas experimentalmente con las ya conocidas ecuaciones empíricas de Hollomon y Ramberg-Osgood, así como con el modelo recientemente propuesto por Rasmussen. Se encontró que para el material recocido o normalizado, no se pueden utilizar las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen debido a las características de la curva esfuerzo deformación, por lo que para este caso se aplicó la ecuación de Hollomon. Para el material trabajado en frío, la ecuación propuesta por Rasmussen muestra el mejor ajuste entre los modelos considerados en este trabajo.[6]

*Potenza y Tinedo* (2007) presentaron un estudio del comportamiento elasto plástico en tracción de láminas de aleaciones de aluminio. Se determinaron las propiedades necesarias para realizar el ajuste de las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen, usando datos recopilados de la literatura. Se ajustó el exponente  $m$  de la ecuación de Rasmussen, proporcionando una buena aproximación en la zona plástica



---

de las curvas esfuerzo-deformación de las aleaciones de aluminio 3003, 6063, 2024 y 6061. Se realizó el ajuste de los parámetros de la ecuación de Rasmussen y posteriormente se realizó la validación de la ecuación obtenida usando la aleación 8011, con lo cual quedó demostrado que la ecuación hallada funciona y se ajusta a las aleaciones de aluminio estudiadas, ajustándose en todos los casos perfectamente la curva experimental a la propuesta. Además fueron obtenidas correlaciones para determinar el esfuerzo último y la deformación última en función de los tres parámetros de Ramberg-Osgood, los cuales son necesarios para definir la ecuación de Rasmussen. [12]

## 2.2 BASES TEÓRICAS

### Aleaciones de aluminio

Las aleaciones de aluminio se diferencian entre sí según el método de transformación:

- Aleaciones de forja: Se obtienen a partir de colada de fundición en forma de placas, colada continua o tochos, utilizadas para formar productos por deformación plástica.
- Aleaciones de moldeo: Se utilizan en la fabricación de piezas obtenidas por medio de fundición a través de colada del metal en moldes, para lograr obtener piezas con formas complejas.

La Aluminium Association (AA), ha agrupado a las aleaciones de aluminio de acuerdo a sus principales elementos aleantes, basándose en las normas ANSIIH35.1.

Estas se agrupan por series, de la 1XXX a la 9XXX. Por ejemplo la serie 10XX,



---

que representa los diferentes grados de aluminio natural, el nivel de pureza es indicado por los últimos dos dígitos; el caso de series 2XXX hasta la 8XXX, el segundo dígito indica la modificación que se a hecho a las aleaciones originales y los últimos dos dígitos indican cuando una aleación es nueva o modificada, las aleaciones de aluminio más comunes y su designación según Aluminium Association (AA) se muestran en la *Tabla 2.1.* [3]

Algunas de las características que le confieren estos aleantes al aluminio tenemos:

- 1 El cobre, Cu, facilita la colabilidad en los procesos de fabricación y desgasificación en su producción, a su vez permite el endurecimiento por envejecimiento.
- 2 El Silicio, Si, mejora las características del aluminio para el moldeo, aumenta su fluidez en estado líquido, reduce la temperatura de fusión, disminuye la tendencia a la fragilidad en caliente, conserva baja la densidad, y mejora la resistencia a la abrasión.
- 3 El magnesio, Mg, facilita la colabilidad mejorando las características mecánicas y aumentando la resistencia a la corrosión.
- 4 El zinc, Zn, aumenta la fragilidad en el aluminio y disminuye la resistencia a la corrosión.
- 5 El hierro, Fe, aumenta ligeramente la resistencia a la tracción, fluencia y alargamiento a cambio del incremento de su densidad.
- 6 El titanio, Ti, afina el grano de las aleaciones de moldeo, logrando mejorar los procesos de fabricación en las coladas con moldes, además mejora todas las



características mecánicas del aluminio.

**Tabla 2.1. Designación de las aleaciones de aluminio según Aluminium Association**

<i>Principales elementos aleantes</i>	<i>Serie</i>
Aluminio con mas de 99% de pureza	1XXX
Cobre	2XXX
Manganeso	3XXX
Silicio	4XXX
Magnesio	5XXX
Magnesio y Silicio	6XXX
Zinc	7XXX
Otros elementos (Hierro, silicio, entres otros)	8XXX
Series no comunes	9XXX

**Fuente: Ciencia e Ingeniería de Materiales [4]**

- 7 También el Manganeso, Mn, es un buen elemento de aleación debido a que aumenta la resistencia tanto mecánica como a la corrosión.
- 8 El Níquel, Ni, con esta adición reduce la fragilidad en el intervalo de temperatura de trabajo, el titanio y el Circonio recristaliza la estructura más fina después de un forjado.
- 9 El Plomo, Pb, y el Bismuto, Bi, se usan en el aluminio para mejorar la maquinabilidad y laborabilidad.
- 10 El Cobalto, Co, actúa satisfactoriamente sobre la maquinabilidad y resistencia mecánica, mientras que el Cadmio, Cd, y Estaño, Sn, confieren un incremento adicional a la dureza de las aleaciones susceptible de tratamientos térmicos (envejecimiento). (*Hoyos et al, 2004*)

En la *Tabla 2.2* se muestran los grados de templado de las aleaciones de aluminio, esto determina la clasificación del aluminio en aluminio para forja o aluminio para



fundición, lo cual va a depender de su proceso de manufactura.

Las aleaciones para forja que se conforman mediante deformación plástica tienen composiciones y micro-estructuras significativamente distintos de las creadas para fundición, lo cual refleja los distintos requerimientos del proceso de manufactura. Dentro de cada grupo principal se pueden dividir las aleaciones en 2 grandes subgrupos: las tratables térmicamente y las no tratables térmicamente.

Las aleaciones de aluminio se clasifican siguiendo el sistema de numeración ya explicado en la *Tabla 2.1*. El primer número define los principales elementos de aleación y los números restantes se refieren a la composición específica de la misma.

El grado de endurecimiento se da mediante la clasificación de temple T o H, dependiendo de que la aleación sea tratada térmicamente o endurecida por deformación. Otras clasificaciones indican si es recocida (0), tratada por solución (W) o utilizada tal y como fue fabricada (F). Los números que siguen a la T o a la H indican la cantidad de endurecimiento por deformación, el tipo exacto de tratamiento térmico u otros aspectos especiales del procesamiento de la aleación y sus formas típicas y propiedades.

Los tratamientos térmicos modifican la estructura cristalina de los materiales sin alterar su composición química, proporcionándole características mecánicas concretas, mediante procesos de calentamientos y enfriamientos sucesivos hasta conseguir la estructura cristalina deseada. Además estos tratamientos están diseñados para proporcionar una distribución óptima de 2 o más fases en la micro-estructura.



Tabla 2.2 Grados de templados para las aleaciones de aluminio

<i>Designación del Tratamiento térmico</i>	<i>Significado de la designación</i>
F	Tal como se fabricó (Trabajo en caliente, forja, fundición, etc.)
0	Recocido (en el estado más blando posible)
H	Trabajado en frío
H1x	Trabajado en frío solamente (la x se refiere a la cantidad de trabajo en frío y de endurecimiento)
H12	Trabajo en frío que proporciona una resistencia a la tensión intermedia entre 0 y H14
H14	Trabajo en frío que aporta una resistencia a la tensión intermedia entre 0 y H18
H16	Trabajo en frío que proporciona una resistencia a la tensión intermedia entre H14 y H18
H18	Trabajo en frío que resulta en una reducción de aproximadamente 75%
H19	Trabajo en frío que proporciona una resistencia a la tensión superior a los 2000 psi de la obtenida mediante el H18.
H2x	Trabajo en frío y parcialmente recocida
H3x	Trabajado en frío y estabilizado a una temperatura baja, para evitar endurecimiento por envejecimiento de la estructura.
W	Tratada por solución
T	Endurecida por envejecimiento
T1	Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida naturalmente
T2	Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida naturalmente
T3	Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida naturalmente
T4	Tratada por solución y envejecida naturalmente
T5	Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida artificialmente
T6	Tratada por solución y envejecida artificialmente
T7	Tratada por solución, estabilizada por sobre-envejecimiento
T8	Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida artificialmente
T9	Tratada por solución, envejecida artificialmente y trabajada en frío
T10	Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y artificialmente envejecida.

Fuente: Ciencia e Ingeniería de Material [4]



---

## 2.3 Ajustes.

### 2.3.1 Ajuste por Mínimos Cuadrados.

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

### 2.3.2 Ajuste por Mínimos Cuadrados lineal.

El procedimiento más objetivo para ajustar una recta a un conjunto de datos presentados en un diagrama de dispersión se conoce como el método de los mínimos cuadrados lineal [10]. La recta resultante presenta dos características importantes:

a) Es nula la suma de las desviaciones verticales de los puntos a partir de la recta de ajuste:

$$\sum(Y_0 - Y) = 0$$

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

$$\sum(Y_0 - Y)^2 \rightarrow 0$$



---

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  $\hat{Y}$  nos 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:

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

Tomemos 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 llamadas ecuaciones normales del modelo que pueden ser resueltas por cualquier método ya sea igualación o matrices para obtener los valores de a y b.

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

Derivamos parcialmente la ecuación respecto de a:

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



$$\begin{aligned} &= \sum (y - a - bx) = 0 \\ &= \sum y - na - b \sum x = 0 \\ \sum y &= na + b \sum x \quad (\text{Primera ecuación normal}) \end{aligned}$$

Derivamos parcialmente la ecuación respecto de b:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial b} &= 2 \sum (y - a - bx)(-x) = 0 \\ &= -2 \sum (y - a - bx)(x) = 0 \\ &= \sum (y - a - bx)(x) = 0 \\ &= \sum (xy - ax - bx^2) = 0 \\ &= \sum xy - a \sum x - b \sum x^2 = 0 \\ \sum xy &= a \sum x + b \sum x^2 \quad (\text{Segunda ecuación normal}) \end{aligned}$$

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

### 2.3.3 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 éstos.

A continuación se muestra la realización y aplicación del método de los mínimos



cuadrados no lineal según la metodología de *Ciaccia et al* (2006), para la obtención del parámetro  $m$  de la ecuación de Rasmussen.

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

$$\frac{\partial S}{\partial c_k} = \frac{\partial}{\partial c_k} \sum_{i=1}^P (y_i - F(\bar{c}, x_i))^2 \quad \text{Ecuación 2.17}$$

donde  $F(\bar{c}, x_i)$  es la función de ajuste,  $\bar{c}$  es el vector de coeficientes de ajuste  $[c_1, c_2, \dots, c_q]$ ,  $q$  es el número 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 Rasmussen que define el comportamiento de la zona plástica, es decir:

$$e = \frac{S - S_{0,2}}{E_{0,2}} + e_u \left( \frac{S - S_{0,2}}{S_u - S_{0,2}} \right)^m + e_{0,2}, \Rightarrow S \geq S_{0,2} \quad \text{Ecuación 2.18}$$

Se efectúan cambios de variable para facilitar la manipulación:

$$x = \left( \frac{S - S_{0,2}}{S_u - S_{0,2}} \right); \rightarrow S - S_{0,2} = (S_u - S_{0,2})x \rightarrow y = e \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Quedando la *Ecuación 2.20* como:

$$y = e_{0,2} + \frac{S_u - S_{0,2}}{E_{0,2}} x + e_u x^m, \rightarrow x > 0 \quad \text{Ecuación 2.20}$$

Simplificando aún más:



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

La ecuación 2.20 se puede expresar como:

$$y = a_1 + a_2x + a_3x^m, \quad x > 0 \quad \text{Ecuación 2.21}$$

Tomando la Ecuación 2.21 como ecuación de ajuste, se puede inferir que el único parámetro de ajuste es  $c_k = c_1 = m$ . Sustituyendo la Ecuación 2.21 en la Ecuación 2.17 se obtiene:

$$\frac{\partial S}{\partial m} = \frac{\partial}{\partial m} \sum_{i=1}^P \left( y_i - (a_1 + a_2x_i + a_3x_i^m) \right)^2 = 0$$
$$\sum_{i=1}^P \left[ 2 \left( y_i - (a_1 + a_2x_i + a_3x_i^m) \right) (-a_3mx_i^{m-1}) \right] = 0 \quad \text{Ecuación 2.22}$$

En la Ecuación 2.22 se puede extraer de la suma el factor común constante  $-2a_3$ , y simplificarlo:

$$\sum_{i=1}^P \left( y_i - (a_1 + a_2x_i + a_3x_i^m) \right) mx_i^{m-1} = 0 \quad \text{Ecuación 2.23}$$

Luego, para cada material se tiene un juego de valores  $(S, \varepsilon)$  para los cuales se realiza el ajuste de la Ecuación 2.18, previo cálculo de los parámetros  $S_{0,2}$ ,  $\varepsilon_{0,2}$ ,  $S_u$  y  $\varepsilon_u$ , resolviendo con métodos numéricos la Ecuación 2.23 para obtener el valor de  $m$ .



### 2.3.4 Coeficiente de correlación.

Describe la intensidad de la relación entre dos conjuntos de variables de nivel de intervalo. Es la medida de la 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, más fuerte será la asociación lineal entre las dos variables. Mientras más cercano a cero sea el coeficiente de correlación indicará que más débil es la asociación entre ambas variables. Si es igual a cero se concluirá que no existe relación lineal alguna entre ambas variables al que se le esté realizando el estudio, esto se muestra de una mejor manera a continuación en la *Tabla 2.3*.

**Tabla 2.3 Clasificación según grado de coeficiente de correlación**

<i>Coef. de correlación <math>R^2</math> (%)</i>	<i>Clasificación del coef. de correlación <math>R^2</math></i>
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, alto, importante
0,9-1,0	Correlación muy fuerte, muy alto

**Fuente:** *Mata et al, (2004)*

La correlación entre los valores de dos variables es un hecho y esta se muestra en la *Ecuación 2.24* El que lo consideremos 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 e Y están correlacionadas, esto puede ser porque X causa a Y, o porque Y causa a X o porque alguna otra variable afecta tanto a X como Y, o por una combinación de todas estas razones; o puede ser que la relación sea una



coincidencia. (Mata et al, 2004)

$$R^2 = \frac{1/n * \sum (x_i - x_m) * (y_i - y_m)}{\left( \left( 1/n * \sum (x_i - x_m)^2 \right) * \left( 1/n * \sum (Y_i - Y_m)^2 \right) \right)^{1/2}} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

Donde:

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 resultado se divide por el tamaño de la muestra.

Denominador: se calcula el producto de las varianzas de “x” y de “y”, y a este producto se le calcula la raíz cuadrada.



---

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO.

#### 3.1 Tipo de Investigación.

La investigación es un proceso que, mediante la aplicación del método científico, procura obtener información relevante y fidedigna para entender, verificar, corregir o aplicar el conocimiento. Para obtener algún resultado de forma clara y precisa, es necesario aplicar algún tipo de investigación que ayude al investigador a regirse de manera eficaz en la misma. Este trabajo de grado, según la clase de medios utilizados para obtener los datos, se enmarca en la modalidad de una investigación de tipo Documental y Experimental, puesto que la investigación es llevada a cabo apoyándose en fuentes de carácter documental: fuentes bibliográficas (consulta de libros) y fuentes hemerográficas (consultas en artículos o ensayos de revistas), con lo cual se recopiló información de las aleaciones de aluminio en estudio y con ello se obtuvieron los datos teóricos, que posteriormente se ajustaron a los parámetros de las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen. Este ajuste se verificó manipulando las variables carga- alargamiento de manera experimental de las aleaciones AA-1100, AA-1350 y AA-1050, en condiciones rigurosamente controladas.

#### 3.2 Nivel de la Investigación.

El nivel de una investigación viene dado por el grado de profundidad y alcance que se pretende con la misma. Aquí se definen los propósitos del investigador y lo que intenta alcanzar con su investigación. Según los objetivos planteados en este trabajo de grado la investigación se basa en un estudio de nivel descriptivo, ya que se miden variables (carga-alargamiento), con el fin de especificar las propiedades de las aleaciones en estudio y ajustarlas a las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen, además de que se está partiendo de un modelo teórico ya definido.



---

### 3.3 Diseño de la Investigación

Su objeto es proporcionar un modelo de verificación que permita contrastar hechos con teorías, y su forma es la de una estrategia o plan general que determina las operaciones necesarias para realizar la investigación. Para llevar a cabo este trabajo de grado se siguieron los siguientes lineamientos:

#### 3.3.1 Revisión bibliográfica.

- Generalidades del aluminio y las aleaciones AA-1100, AA-1050 y AA-1350.
- Curvas Esfuerzo- Deformación Ingenieril de las aleaciones AA-1100, AA-1050 y AA-1350.
- Curvas Esfuerzo- Deformación Verdadera de las aleaciones AA-1100, AA-1050 y AA-1350.
- Referencias de las ecuaciones Esfuerzo- Deformación Ingenieril.
- Referencias de las ecuaciones Esfuerzo- Deformación Verdadera.

#### 3.3.2 Búsqueda de las aleaciones en estudio

- Indagación de las empresas en el eje central que trabajan con las aleaciones AA-1100, AA-1050 y AA-1350.
- Visita a dichas empresas y adquisición del material necesario para realizar los ensayos a tracción.

#### 3.3.3 Aprendizaje del uso y manejo de los equipos de laboratorio.

- Equipo universal de ensayos de materiales.
- Cortadora de sierra de banda
- Laminador experimental



---

### **3.3.4 Elaboración de las probetas.**

- Demarcación de las láminas y de los cilindros para su corte.
- Corte de las láminas y de los cilindros.
- Obtención de la probeta, con el uso de un torno control numérico.

### **3.3.5 Realización de los ensayos a tracción.**

### **3.3.6 Aprendizaje del uso y manejo de programas.**

- Hoja de cálculo.
- Programa Windig 25.
- Lenguaje de programación.

### **3.3.7 Obtención de los parámetros de las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen**

- Digitalización de las curvas Esfuerzo-Deformación recopiladas de la literatura.
- Utilización del programa Windig25 para obtener los valores necesarios de la digitalización de las curvas.
- Traslado de la data obtenida de la digitalización a hoja de cálculo.
- Obtención de las propiedades mecánicas de dichas aleaciones.
- Ajustar de las aleaciones AA-1100 y AA-1350 los parámetros según las ecuaciones preestablecidas.

### **3.3.8 Verificación de los parámetros de las ecuaciones de Ramberg Osgood y Rasmussen**

- Definir los parámetros necesarios de la ecuación de Ramberg -Osgood y Rasmussen de la AA-1050.



- Obtener el parámetro  $m$  a partir de metodología de *Ciaccia et al* (2006).
- Comparar el comportamiento de las curvas propuestas con las experimentales y las obtenidas de la literatura.
- Verificar el coeficiente de correlación.

### 3.4 Procedencia y características originales del material

Esta investigación se realizó para 3 aleaciones de la serie 1000: AA-1100, AA-1050 y AA-1350. Estas aleaciones fueron donadas por empresas privadas como se señala a continuación:

- 1) **AA-1100**; suministrada por la empresa INDALVEN C.A”, ubicada en la Zona Industrial El Piñonal, Edo Aragua; en cortes longitudinales y transversales según el sentido de laminación, con dimensiones de 10 mm de ancho por 100 mm de largo y espesores de 3,5; 2,5; 2; 1,3; 1 y 0,7 mm. Estas láminas provienen de una bobina con un espesor inicial de 6 mm que fueron posteriormente laminados en frío hasta obtener los espesores ya mencionados.
- 2) **AA-1050**; facilitada por “INMEVAL”, situada en la Zona Industrial El Recreo, Valencia – Edo. Carabobo, en cortes longitudinales con el mismo sentido de laminación y dimensiones de 10 mm de ancho por 100 mm de largo, de 0,5mm de espesor. Procedentes de un espesor inicial de 6 mm que fueron posteriormente laminados en frío hasta obtener el espesor ya indicado.
- 3) **AA-1350**; proporcionada por “PHEPLS DODGE CONAL C.A.”, ubicada en la Zona Industrial II de Valencia – Edo. Carabobo, en barras cilíndricas de 9,52 mm de diámetro y 500 mm de longitud, obtenidas del trefilado de un cilindro de 52,25 mm para llegar a las dimensiones antes citadas.



### 3.5 Composición química de las aleaciones de aluminio.

Tabla 3.1 Composición química del AA-1100 utilizado

Elemento	B	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Pb	Si	Ti	Zn	Al
Cantidad (%)	0,002	0,0001	0,126	0,48	0,001	0,002	0,001	0,001	0,065	0,009	0,003	99,31

Fuente: INDALVEN C.A.

Tabla 3.2 Composición química de la AA-1050

Elemento	Fe	Mg	Mn	Si	Al
Cantidad (%)	0,27	0,002	0,003	0,09	99,64

Fuente: INMEVAL C.A.

Tabla 3.3 Composición química de la AA-1350

Elemento	Fe	Mg	Si	Al
Cantidad (%)	0,16	0,003	0,049	99,79

Fuente: PHEPLS DODGE CONAL C.A.

### 3.6 Preparación De Probetas.

Debido a la geometría que presentaba el material fue necesario realizar dos tipos de probetas.

#### 3.6.1 Probetas planas

Para las aleaciones AA-1050 y AA-1100 se realizaron probetas según la norma ASTM E-8M [2] de láminas planas tipo sheet, cuyas dimensiones se muestran en la *Figura 3.1*.

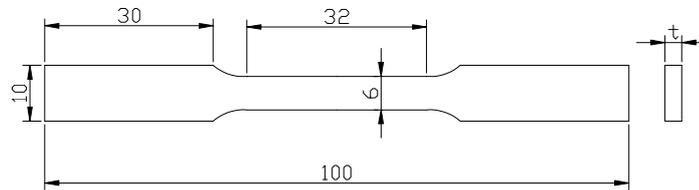


Figura 3.1 Probeta tipo "sheet" según norma ASTM E-8M.

### 3.6.2 Probetas cilíndricas

Para la aleación AA-1350, las probetas se mecanizaron según la norma ASTM B557M [2] cuyas especificaciones se muestran en la *Figura 3.2*.

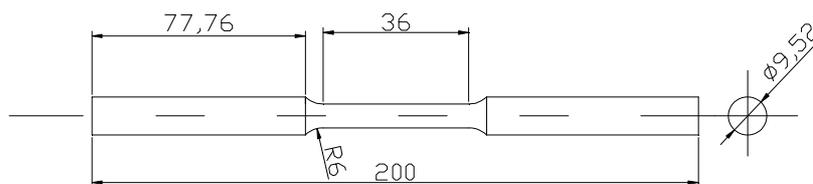


Figura 3.2. Probeta cilíndrica de 200 mm de longitud según la norma ASTM E- 8M - 08

### 3.7. Ensayos de tracción.

#### 3.7.1. Ensayos de tracción para probetas planas

El ensayo se realizó bajo la norma ASTM E 8M-08. Se empleó un equipo universal de ensayos de materiales MTS-810 con una capacidad de hasta 25 ton. con sistema de adquisición de datos DPMAC R1.1, este equipo está ubicada en la Universidad Simón Bolívar y cuenta con un extensómetro marca Instron con longitud inicial de prueba de 1", el cual arrojó los valores de alargamiento en la longitud calibrada.



### 3.7.2. Ensayos de tracción de barras cilíndricas.

El ensayo se realizó bajo la norma ASTM A-370. Se empleó un equipo universal de ensayos DI-CPC/V2 marca Hoyton Serie 02M2359 con una capacidad de hasta 1000 kN, este equipo está ubicado en el Edificio CEDEA Av. Universidad c/c Prolongación La Victoria – Edo. Aragua.

### 3.8 Población y muestra.

#### 3.8.1 Curvas carga-alargamiento de la literatura

Las aleaciones obtenidas de la literatura fueron el resultado de investigaciones de tipo físico y digital, pero la data es muy poca. En la *Tabla 3.4* se muestran las pocas aleaciones recopiladas.

**Tabla 3.4 Aleaciones obtenidas de la literatura**

<i>Tipo de Aleación</i>	<i>Número de Probetas</i>	<i>Ángulo de Laminado</i>	<i>Tratamiento Térmico</i>	<i>Deformación(%)</i>
1050	1	0°	N	50
1050	1	0°	N	50

#### 3.8.2 Curvas carga-alargamiento obtenidas de ensayos

En la *Tabla 3.5* se muestran las características y condiciones de las probetas ensayadas para las diferentes aleaciones.



Tabla 3.5 Probetas ensayadas de las diferentes aleaciones

Tipo de Aleación	Número de Probetas	Ángulo de Laminado	Tratamiento Térmico	Deformación (%)
1050	2	0°	N	92
1100	3	0°	O	42
1100	3	90°	O	59
1100	3	0°	O	67
1100	5	0°	O	79
1100	2	0°	O	84
1100	2	0°	O	89
1350	7	0°	H14	97

Total de probetas para ensayos de tracción = 27.

Número de ensayos de tracción = 27.

De las 27 probetas ensayadas sólo se tomaron 15 ensayos para efectos de cálculos por las razones siguientes: 10 curvas se descartaron por no presentar una tendencia clara en la zona elástica y por arrojar resultados no coherentes en la transición de la zona elástica plástica, se presume que la máquina no estaba calibrada para ensayar este tipo de aleaciones de aluminio. Por otro lado, 2 curvas fueron descartadas porque no se ajustaban a las correlaciones obtenidas.

### 3.8.3 Nomenclatura de las curvas obtenidas de la literatura y de la validación.

Para la realización de este trabajo de grado se utilizó una nomenclatura que identifica a cada probeta con los parámetros más importantes de las mismas y a su vez fue usada en las hojas de cálculos para realizar los ajustes.

**3.8.3.1 Nomenclatura de las probetas planas:** A continuación se hace una explicación detallada de la nomenclatura implementada.

- Los primeros 4 números identifican la serie a la cual pertenece la aleación de aluminio.



- 
- Luego se observan 1 ó 2 letras que determinan el tratamiento térmico al cual fue sometido la aleación.
  - Aparecen 1 ó 2 números que indican el grado de laminación del material.
  - Aparecen 4 dígitos que indican el grado de deformación del material.
  - Dos dígitos que indican el espesor de la lámina.
  - Y finalmente 1 dígito que indica el número de probetas con las mismas características.

**Nota:** Todos estos elementos van separados por guiones.

Para validar la nomenclatura descrita anteriormente se va a hacer la identificación a la siguiente muestra:

**1050 – N - 0° - 91,67 - 0,5 – 1**

De esta nomenclatura y siguiendo con lo anteriormente descrito se identifica que la probeta:

Es una aleación de aluminio de la serie 1050, con un recocido en el estado más blando posible, con un grado de deformación de 91.67%, un espesor de 0.5 mm. y es la 1era probeta de las ensayadas con estas características.

**3.8.3.2 Nomenclatura de las probetas cilíndricas:** A continuación se hace una explicación detallada de la nomenclatura implementada.

- Los primeros 4 números identifican la serie a la cual pertenece la aleación de aluminio.
- Luego se observan 1 ó 2 letras que determinan el tratamiento térmico al cual fue sometido la aleación.
- Aparecen 4 dígitos que indican la relación de extrusión del cilindro.



- Y finalmente 1 dígito que indica el número de probetas con las mismas características.

**Nota:** Todos estos elementos van separados por guiones.

Para validar la nomenclatura descrita anteriormente se va a hacer la identificación a la siguiente muestra:

**AA – 1350 – H14 -96,68 -1**

De esta nomenclatura y siguiendo con lo anteriormente descrito se identifica que la probeta:

Es una aleación de aluminio, de la serie 1350, trabajada en frío y este tratamiento térmico le aporta una resistencia a la tensión intermedia entre 0 y H18, con una relación de reducción de área de 96,68% y es la 1era probeta de las ensayadas con estas características.

### **3.9 Ajuste de Parámetros.**

Una vez finalizada la investigación teórica y realizados los ensayos de tracción se procedió a recopilar todas las curvas, y con la ayuda del programa Windig25 se digitalizaron, la data obtenida de la digitalización fue trasladada a la hoja de cálculo donde se determinaron las propiedades que definen los parámetros de las ecuaciones de Ramberg - Osgood y Rasmussen, excepto el parámetro  $m$  que posteriormente será ajustado. En la *Tabla 3.6* se muestra un ejemplo de las propiedades obtenidas mediante la hoja de cálculo, las cuales se hicieron para cada probeta ensayada y nos van a permitir determinar los parámetros independientes  $E_0$ ,  $S_{0,01}$ ,  $S_{0,2}$ ,  $S_w$  y  $e_u$ , necesarios para definir la ecuación de Rasmussen. *Ecuación 2.15*.



En la *Tabla 3.6* se muestran los parámetros que definen la ecuación de Rasmussen obtenidos de la hoja de cálculo y del análisis de las curvas.

**Tabla 3.6 Ejemplo de la tabulación de los parámetros para definir la ecuación de Rasmussen**

$S_u$ (Mpa)	$e_u$ (mm/mm)	$\bar{\epsilon}_{up}$	$E_o$ (Mpa)	$S_{0,01}$ (Mpa)	$S_{0,2}$ (Mpa)	$e_{0,2}$ (mm/mm)	$n$	Rel $e$	$E_{0,2}$ (Mpa)
98,74	0,07	0,05	15907	75,05	84,64	0,0079	24,9	0,0053	1535

La obtención de los parámetros adicionales de la ecuación de Rasmussen, fueron obtenidos del análisis de las curvas o por ecuaciones preestablecidas como se muestra a continuación:

- $n$ : Exponente de Ramberg - Osgood para determinar la zona no lineal de la curva, definido por la *Ecuación 2.2*.
- $E_{0,2}$ : Valor de la tangente a la curva esfuerzo-deformación en el punto de fluencia a 0,2%, calculado con la *Ecuación 2.12*.
- $e_{0,2}$ : Deformación al esfuerzo de fluencia  $S_{0,2}$  y viene definido por la *Ecuación 2.13*.
- $S_{0,2}$  y  $S_{0,01}$ : determinados según el método offset con una desviación de 0.01 % y 0.2 % respectivamente *Figura 3.3*, según *Rasmussen*, tomado como base para la realización de este trabajo.

Una vez obtenidos estos valores se procedió a calcular el exponente  $m$  que es un coeficiente adimensional que define la forma del codo en la curva esfuerzo-deformación de la ecuación de Rasmussen, este parámetro se obtiene por el método de los mínimos cuadrados no lineal utilizando la metodología de *Ciaccia et al (2006)*, descritos en el Capítulo II.

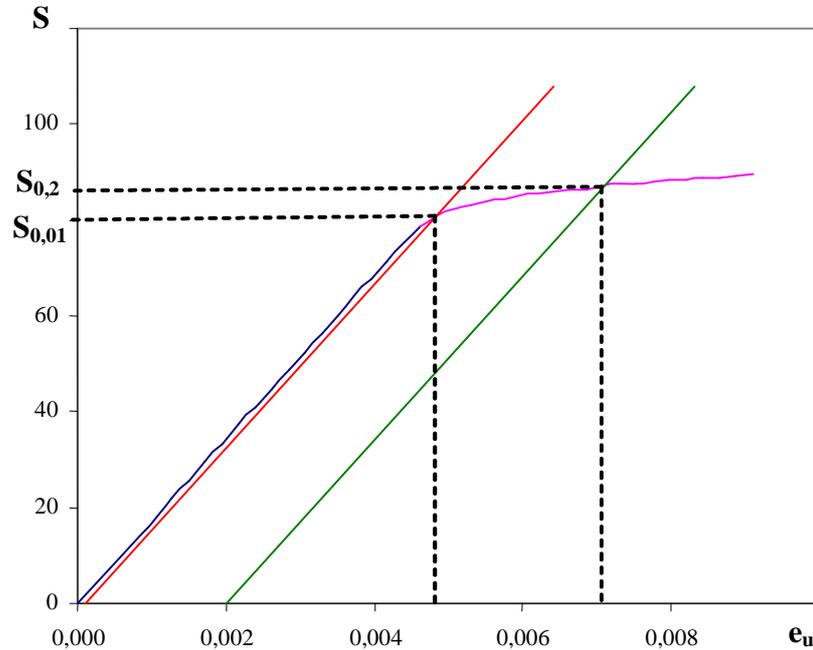


Figura 3.3. Método “offset” aplicado a la curva Esfuerzo – Deformación.

Haciendo uso de la metodología utilizada por Rasmussen se construyeron gráficas  $m$  Vs.  $S_{0,2} / S_u$  correspondientes a cada aleación y a estas se les realizó el ajuste por mínimos cuadrados lineal, obteniéndose la ecuación que describe el parámetro  $m$  de Rasmussen para aleaciones de aluminio.

Luego de definir las ecuaciones se procedió a realizar sus validaciones; para lo cual se aplicó la ecuación obtenida a los datos experimentales de AA-1050, definiendo todos los parámetros de la ecuación de Ramberg – Osgood y Rasmussen, incluyendo el parámetro  $m$ .

A partir de la definición de dichas ecuaciones y con los parámetros ya mencionados se procedió a graficar la curva obtenida a partir del modelo de Ramberg – Osgood y Rasmussen en conjunto con la curva experimental, para luego calcular el coeficiente de correlación existente entre ambas curvas, usando la Ecuación 2.24.



Finalmente, se hizo uso de una hoja de cálculo en donde se tabularon y graficaron los valores de  $S_{0,2}/S_u$  Vs.  $S_{0,2}/E_0$  de las curvas de las aleaciones extraídas de la literatura, se les realizó el ajuste por mínimos cuadrados lineal y se obtuvieron las correlaciones en función de todos los parámetros de Ramberg – Osgood.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS OBTENIDOS

#### 4.1 RESULTADOS

El objetivo principal de este capítulo es presentar los resultados obtenidos en la investigación. En primer lugar se mostrarán los resultados del ajuste de los parámetros de la Ecuación de Ramberg- Osgood y Rasmussen, luego se analizará el proceso de obtención de los parámetros de la ecuación del coeficiente adimensional  $m$ , y finalmente, se muestra la validación de la ecuación obtenida con la aleación de aluminio AA-1050, así como también las correlaciones que existen entre la deformación última y el esfuerzo último en función de los parámetros de Ramberg-Osgood y Rasmussen  $\bar{e}_{up}; e_{0,2}; S_u; S_{0,2}; E_{0,2}$  y  $m$ .

##### 4.1.1 Resultados del ajuste de los parámetros de la ecuación de Ramberg-Osgood y Rasmussen

En la *Tabla 4.1*, se muestran los parámetros que definen las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen para todas las aleaciones.

**Tabla 4.1 Parámetros de la ecuación de Rasmussen de las probetas ensayadas.**

<i>Aleación</i>	$S_u$	$e_u$	$\bar{e}_{up}$	$E_0$	$S_{0,01}$	$S_{0,2}$	$e_{0,2}$	$n$	$E_{0,2}$	$m$
1100-H0-0-88,33-0,7-3	100,3	0,3951	0,3632	5238	52,59	56,31	0,0128	43,89	571,6	9,59
1100-H0-0-78,33-1,3-10	92,63	0,4288	0,3893	4158	59,54	63,14	0,0172	51,05	538,4	5,09
1100-H0-90-58,33-2,5-15	70,43	0,4771	0,4352	2806	38,86	41,80	0,0169	41,19	429,7	7,97
1100-H0-90-58,33-2,5-17	88,49	0,5124	0,4805	4954	54,41	59,69	0,0140	32,32	778,4	5,47
1100-H0-0-41,67-3,5-18	104,1	0,4106	0,3849	7066	58,30	63,10	0,0110	37,90	744,7	10,6
1100-H0-0-41,67-3,5-19	104,7	0,4039	0,3651	4499	54,91	60,24	0,0154	32,32	772	11,3
1100-H0-0-41,67-3,5-20	104,4	0,3608	0,3308	5969	57,90	62,68	0,0125	37,74	729	7,49
1350-H14-96,68-3	173,6	0,1977	0,1452	6463	147,5	152,5	0,0256	89,55	752,3	4,44
1350-H14-96,68-4	197	0,2280	0,1912	10370	151,	164,3	0,0178	35,56	1890	4,32
1350-H14-96,68-5	165	0,0909	0,0404	6351	136,3	143,5	0,0245	58,78	1024	3,33
1350-H14-96,68-6	160,7	0,2010	0,1354	4785	139,3	143	0,0320	113,2	558,3	5,95

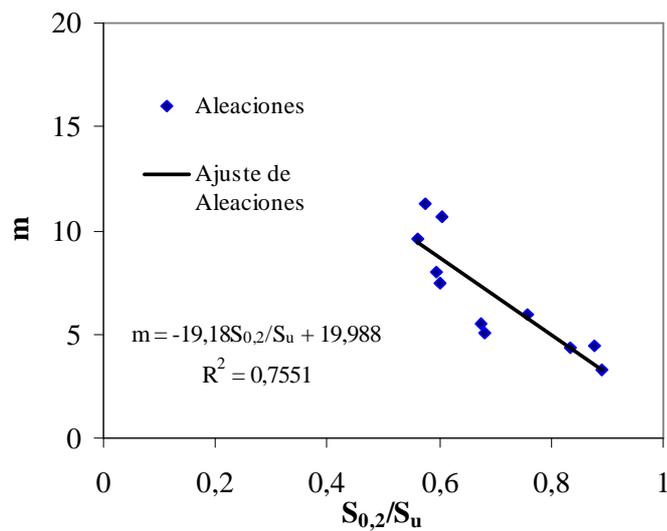


Con los parámetros calculados en la *Tabla 4.1*, se procedió a la tabulación de los valores de  $m$  Vs.  $S_{0,2}/S_u$  *Tabla 4.2*.

**Tabla 4.2 Valores  $m$  ajustados.**

Aleación	$S_{0,2}/S_u$	$m$	$R^2$ (%)
1100-H0-0°-88,33-0,7-1	0,5614	9,59	0,9851
1100-H0-0°-78,33-1,3-3	0,6817	5,09	0,9961
1100-H0-90°-58,33-2,5-1	0,5934	7,97	0,9888
1100-H0-90°-58,33-2,5-3	0,6745	5,47	0,9934
1100-H0-0°-41,67-3,5-1	0,6062	10,63	0,9874
1100-H0-0°-41,67-3,5-2	0,5754	11,28	0,9867
1100-H0-0°-41,67-3,5-3	0,6005	7,49	0,9905
1350-H14-96,68-3	0,8786	4,44	0,9965
1350-H14-96,68-4	0,8342	4,32	0,9984
1350-H14-96,68-5	0,8900	3,33	0,9871
1350-H14-96,68-6	0,7590	5,95	0,9982

A continuación se muestra en la *Figura 4.1*, la ecuación general de  $m$  que se realizó con un ajuste de mínimos cuadrado lineal y su respectivo coeficiente de correlación para aleaciones AA-1100 y AA-1350:



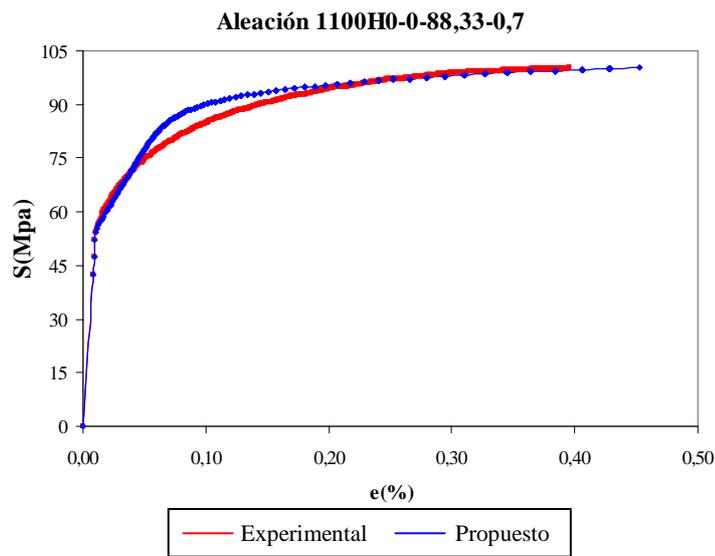
**Figura 4.1 Ajuste por mínimos cuadrados lineal de  $m$  a partir de las AA-1100 y AA-1350.**



Obteniéndose la *Ecuación 4.1*,

$$m = 20 - 19 \left( \frac{S_{0.2}}{S_u} \right) \quad \text{Ecuación 4.1}$$

A continuación *Figuras 4.2 a 4.6* se muestran los comportamientos de las curvas Esfuerzo – Deformación mejor ajustadas de las distintas aleaciones para establecer comparaciones con respecto a los resultados obtenidos. Las demás graficas se pueden observar en el Apéndice A.



**Figura 4.2 Curvas Esfuerzo-Deformación Ingenieril Propuestas y Experimentales de AA-1100-H0-0-88,33-0,7-1**

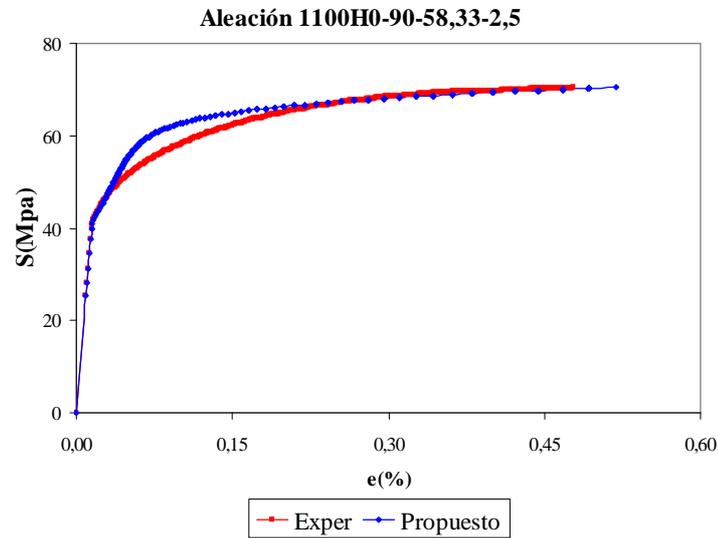


Figura 4.3 Curvas Esfuerzo-Deformación Ingenieril Propuestas y Experimentales de AA-1100-H0-90-58.33-2.5-1

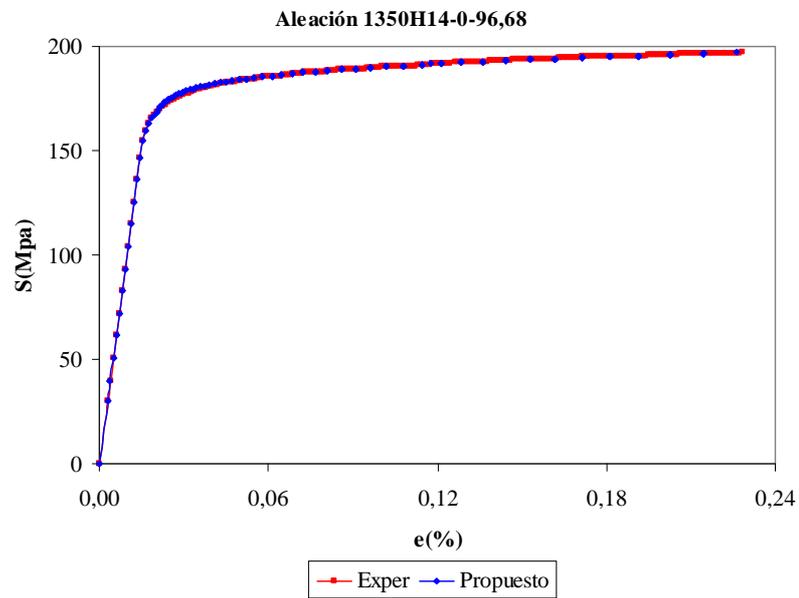
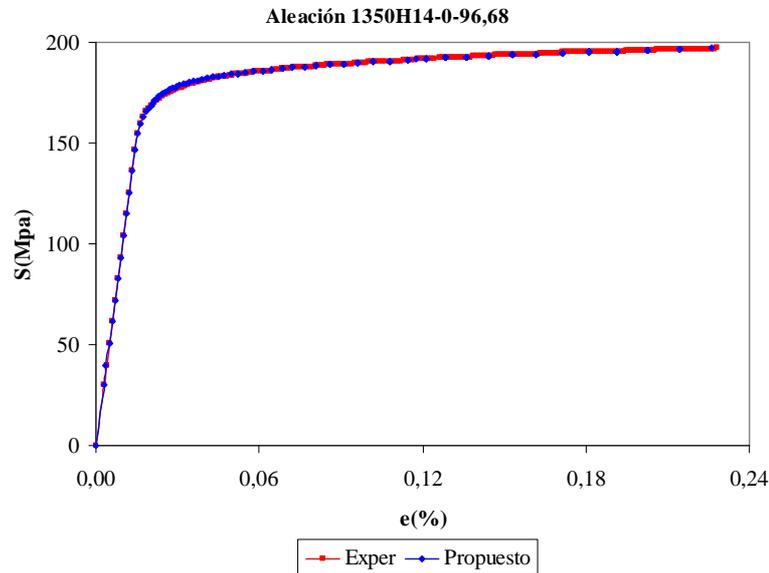


Figura 4.4 Curvas Esfuerzo-Deformación Ingenieril Propuestas y Experimentales de AA-1350-H14-0-96.68-3



**Figura 4.5 Curvas Esfuerzo-Deformación Ingenieril Propuestas y Experimentales de AA-1350-H14-0-96.68-4**

#### 4.1.2 Validación de resultados.

Para verificar los resultados que arrojaron los ajustes de las aleaciones AA-1100 y AA-1350 con respecto al parámetro  $m$  se procederá a la validación de este por medio de otra aleación que pertenezca a la misma serie pero diferente a las usadas para dicho ajuste, esta aleación es la 1050 de la cual se cuenta con datos de la literatura y de ensayos experimentales, para ello se va a hacer uso de la *Ecuación 4.1*, en la cual se calculó  $m$  a partir de la relación  $S_{0,2}/S_u$  para esto fue necesario contar con todos los parámetros de Ramberg - Osgood y Rasmussen, mostradas en la *Tabla 4.3*.

**Tabla 4.3 Parámetros de la ecuación de Rasmussen para la AA-1050**

<i>Aleación</i>	$S_u$	$e_u$	$\bar{e}_{ud}$	$E_0$	$S_{0,01}$	$S_{0,2}$	$e_{0,2}$	$n$	$E_{0,2}$
1050-N-0-91,97-0,5-1	97,13	0,0488	0,0361	17102	80,49	86,94	0,0071	38,89	1045
1050-N-0-91,97-0,5-2	96,90	0,0375	0,0222	13716	80,17	86,09	0,0082	42,01	953,4
1050-T-50-1	210,3	0,3949	0,3602	8900	64,36	79,90	0,0110	13,86	2178
1050-T-50-2	88,52	0,2700	0,2423	5460	44,37	51,43	0,0115	20,28	1029



El cálculo del parámetro  $m$  para la aleación AA-1050 se determinó usando la Ecuación 4.1 y los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Valores de  $m$  determinados según la Ecuación 4.1 para AA-1050

Aleación	$m$ propuesto
1050-N-0-91,97-0,5-1	2,832
1050-N-0-91,97-0,5-2	2,959
1050-T-50-1	12,71
1050-T-50-2	8,856

Finalmente se muestran a continuación Figuras 4.7 a 4.10 las curvas con la cual se realizaron las comparaciones y la validación de todos los parámetros de la aleación de aluminio 1050 para la ecuación de  $m$  propuesta.

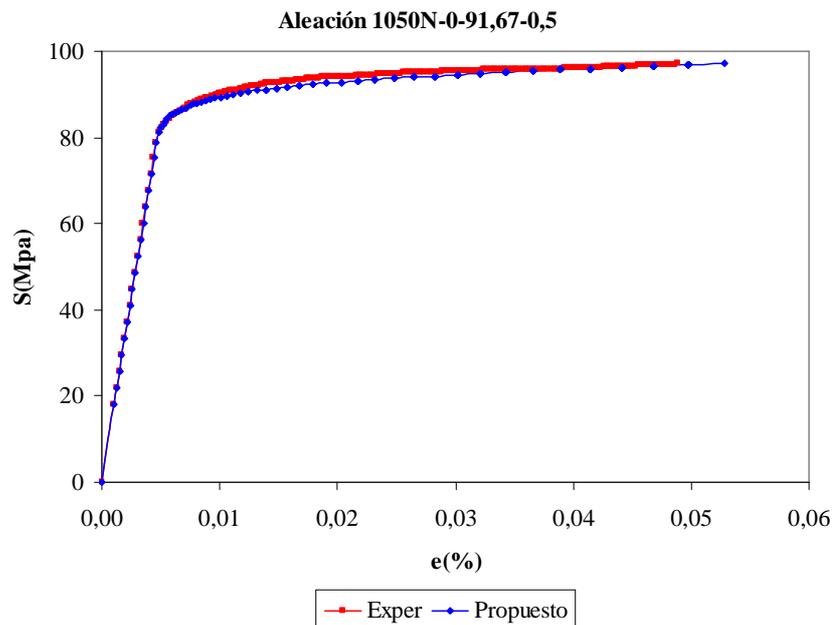


Figura 4.6 Curvas esfuerzo-deformación ingenieril experimentales y propuestas.

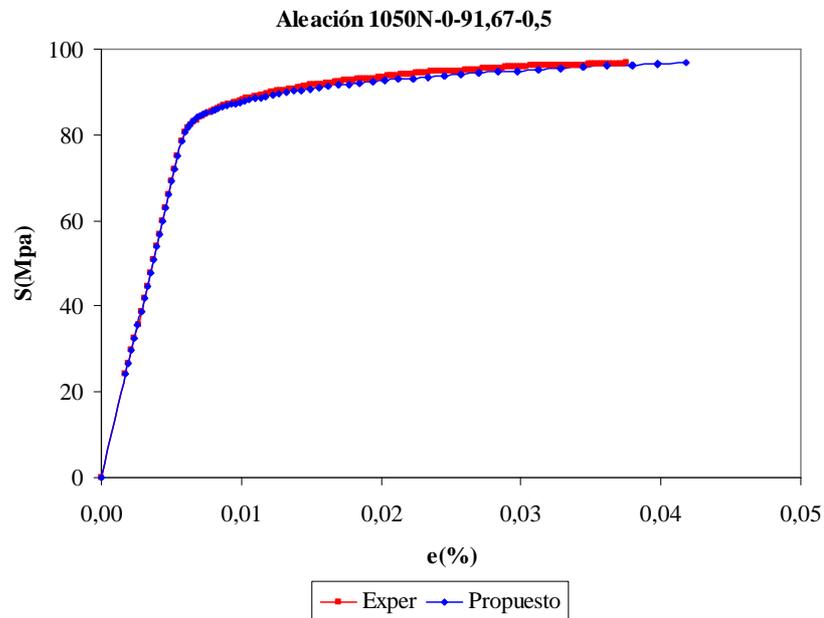


Figura 4.7 Curvas esfuerzo-deformación ingenieril experimentales y propuestas.

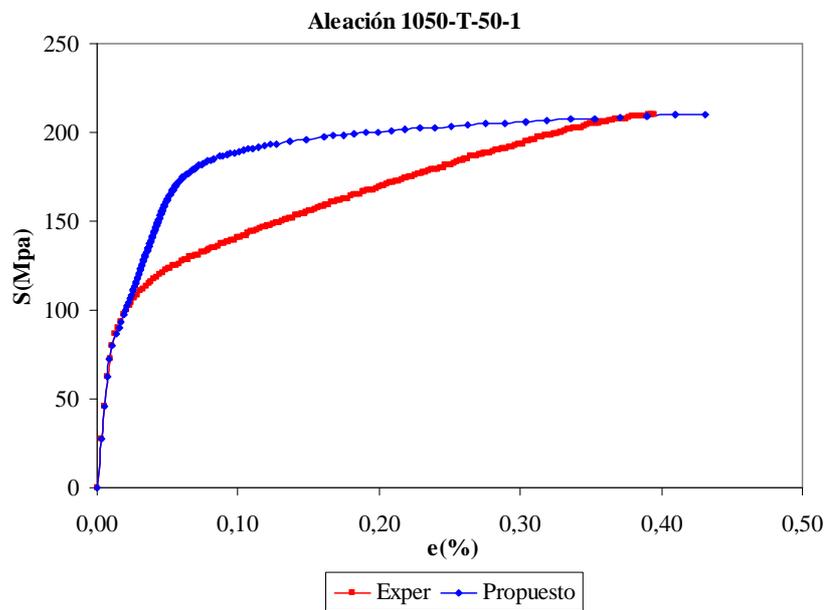


Figura 4.8 Curvas esfuerzo-deformación ingenieril experimentales y propuestas.

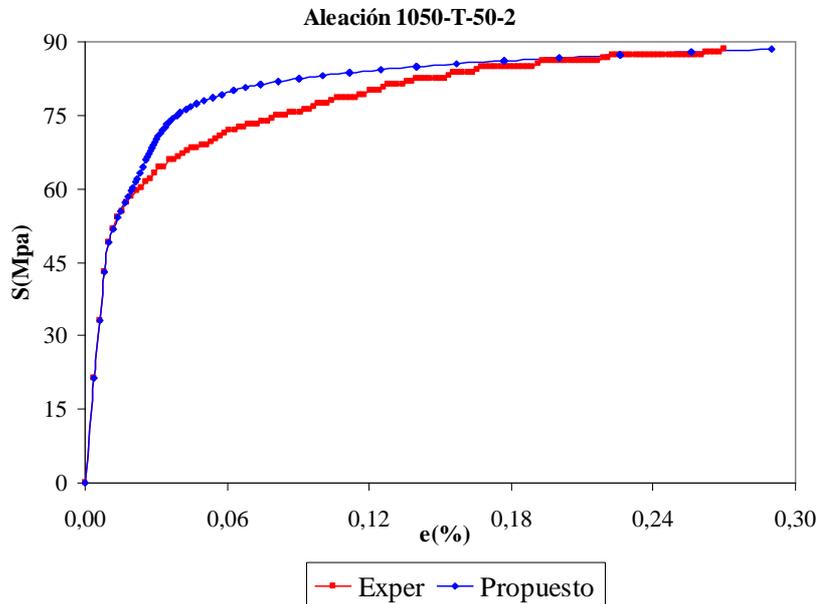


Figura 4.9 Curvas esfuerzo-deformación ingenieril experimentales y propuestas.

En las Figuras 4.8 y 4.9 se observan que las curvas propuestas y experimentales no se ajustan aceptablemente, por lo tanto, es necesario hallar una ecuación ajustada del parámetro  $m$  de la aleación AA-1050 independiente de las demás.

Con los parámetros calculados en la Tabla 4.3, se procedió a la tabulación de los valores de  $m$  Vs.  $S_{0,2}/S_u$  Tabla 4.5; seguidamente en la Figura 4.10 se muestra la ecuación general de  $m$  que se realizó con un ajuste de mínimos cuadrado lineal y su respectivo coeficiente de correlación para la aleación AA-1050.

Tabla 4.5 Valores de  $m$  ajustados solo para AA-1050

Aleación	$S_{0,2}/S_u$	$m$	$R^2$ (%)
1050-N-0-91,97-0,5-1	0,8950	5,18	0,9951
1050-N-0-91,97-0,5-2	0,8884	4,56	0,9975
1050-T-50-1	0,3800	2,36	0,9972
1050-T-50-2	0,5810	3,61	0,9925

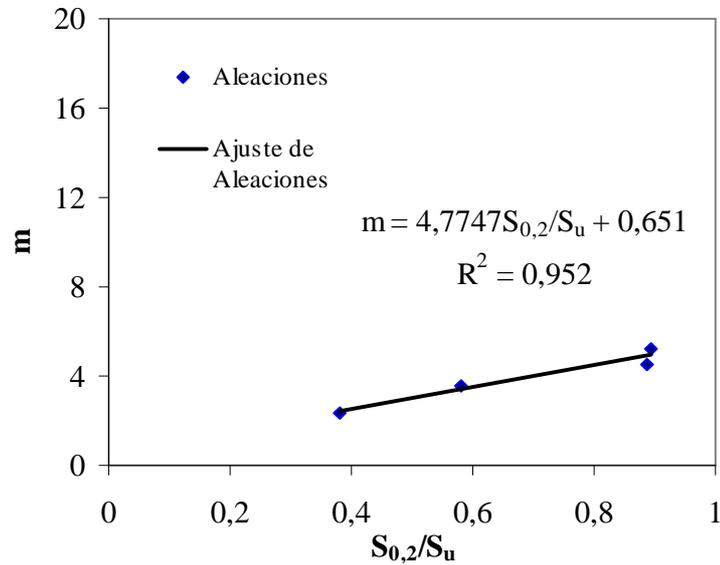


Figura 4.10 Ajuste por mínimos cuadrados lineal de  $m$  de la aleación AA-1050.

Obteniéndose la Ecuación 4.2

$$m = 0,7 + 5 \left( \frac{S_{0,2}}{S_u} \right) \quad \text{Ecuación 4.2}$$

#### 4.1.3 Determinación de las correlaciones de la deformación última y el esfuerzo último

Al hacer seguimiento a la metodología de Rasmussen en la Ecuación 2.3 se observa que la zona elástica depende de tres parámetros  $E_0$ ,  $S_{0,01}$ ,  $S_{0,2}$  y la zona plástica Ecuación 2.10 depende de dos parámetros adicionales  $S_u$  y  $e_u$ ; estos últimos parámetros no necesariamente son dados a conocer por los autores en sus publicaciones. Adicionalmente, en el caso de ensayos a compresión plana no pueden ser determinados los parámetros  $S_u$  y  $e_u$ , debido a que en este tipo de ensayo no se



produce en la probeta la zona del cuello y en consecuencia no existe ruptura de la misma.

Por lo antes mencionado se requiere determinar una expresión que defina las correlaciones  $S_u$  y  $e_u$ , lo cual se logra al graficar  $S_{0,2}/S_u$  Vs.  $S_{0,2}/E_0$  y  $S_{0,2}/S_u$  Vs.  $e_u$ , ya que estos parámetros describen el comportamiento de la curva esfuerzo deformación desde  $S_{0,2}$  hasta  $S_u$ , como lo propone Rasmussen. En la *Tabla 4.5* se muestran los valores de los parámetros de las correlaciones determinadas para cada probeta ensayada.

**Tabla 4.6 Valores de los parámetros de las correlaciones determinados para cada probeta**

<i>Aleación</i>	$S_u$	$E_0$	$S_{0,2}$	$S_{0,2}/E_0$	$S_{0,2}/S_u$	$e_u$
1100-H0-0-88,33-0,7-3	100,31	5238	56,31	0,0107	0,5614	0,3951
1100-H0-0-78,33-1,3-10	92,63	4158	63,14	0,0152	0,6817	0,4288
1100-H0-90-58,33-2,5-15	70,43	2806	41,8	0,0149	0,5934	0,4771
1100-H0-90-58,33-2,5-17	88,49	4954	59,69	0,012	0,6745	0,5124
1100-H0-0-41,67-3,5-18	104,08	7066	63,1	0,0089	0,6062	0,4106
1100-H0-0-41,67-3,5-19	104,69	4499	60,24	0,0134	0,5754	0,4039
1100-H0-0-41,67-3,5-20	104,38	5969	62,68	0,0105	0,6005	0,3608
1350-H14-0-9,5-3	173,56	6463	152,48	0,0236	0,8786	0,1977
1350-H14-0-9,5-4	196,99	10370	164,32	0,0158	0,8342	0,228
1350-H14-0-9,5-5	164,97	6351	143,46	0,0226	0,8696	0,0909
1350-H14-0-9,5-6	160,71	4785	143,02	0,0299	0,89	0,201

Luego se realizó un ajuste por mínimos cuadrados lineal mostrado en la (*Figura 4.12*), quedando la expresión de  $S_u$  de la siguiente manera (*Ecuación 4.3*).

$$\frac{S_{0,2}}{S_u} = 18 \left( \frac{S_{0,2}}{E_0} \right) + 0,4 \quad \text{Ecuación 4.3}$$

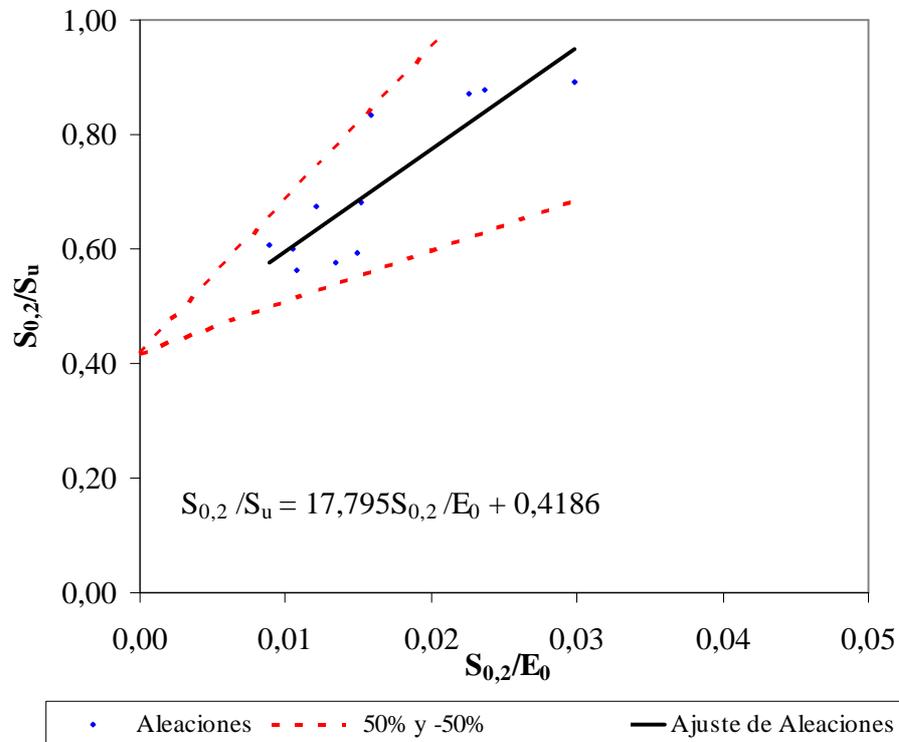


Figura 4.11 Ajuste lineal para esfuerzo último  $S_u$ .

Para definir el error máximo en la determinación de la correlación, se trazaron dos líneas de variabilidad, las cuales se hicieron modificando su amplitud hasta obtener la mayor cantidad de aleaciones dentro de las mismas, esto se determinó a un  $\pm 50\%$  de error de dispersión con respecto a la línea de tendencia de las aleaciones ajustadas.

Para ajustar la correlación que define  $e_u$  se realizó algo similar a lo descrito anteriormente pero esta vez se graficó  $e_u$  Vs.  $S_{0,2}/S_u$  datos extraídos de la *Tabla 4.5* por cada aleación estudiada, ya que estos parámetros describen el comportamiento de la curva esfuerzo deformación desde  $S_{0,2}$  hasta  $S_u$ , como lo propone Rasmussen; los valores obtenidos se muestran en la *Figura 4.13*, donde de igual manera se hizo un ajuste por mínimos cuadrados lineal.

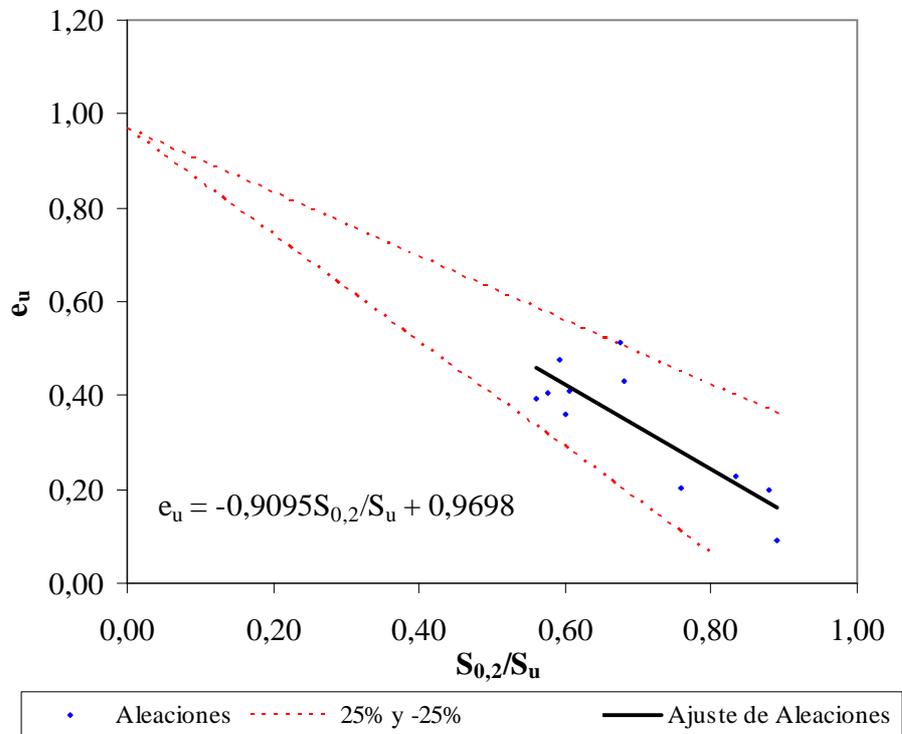


Figura 4.12. Ajuste lineal para deformación última  $e_u$ .

También se trazaron líneas de desviación, utilizando el mismo método de variabilidad empleada en la correlación de  $S_u$  Figura 4.12; las líneas de desviación para el caso de  $e_u$  que engloban la mayor cantidad de aleaciones dentro resultó ser de  $\pm 25\%$  Figura 4.13.

Quedando la expresión de  $e_u$  como:

$$e_u = 1 - \frac{S_{0,2}}{S_u} \quad \text{Ecuación 4.4}$$



Por otra parte, los errores arrojados luego de validar las correlaciones de  $S_u$  y  $e_u$ , no son aceptables y por ello es necesario hallar una ecuación particularizada para la aleación AA-1050.

La expresión ajustada de  $S_u$  para la aleación AA-1050 se muestra a continuación:

$$\frac{S_{0,2}}{S_u} = 1,5 - 107 \left( \frac{S_{0,2}}{E_0} \right) \quad \text{Ecuación 4.5}$$

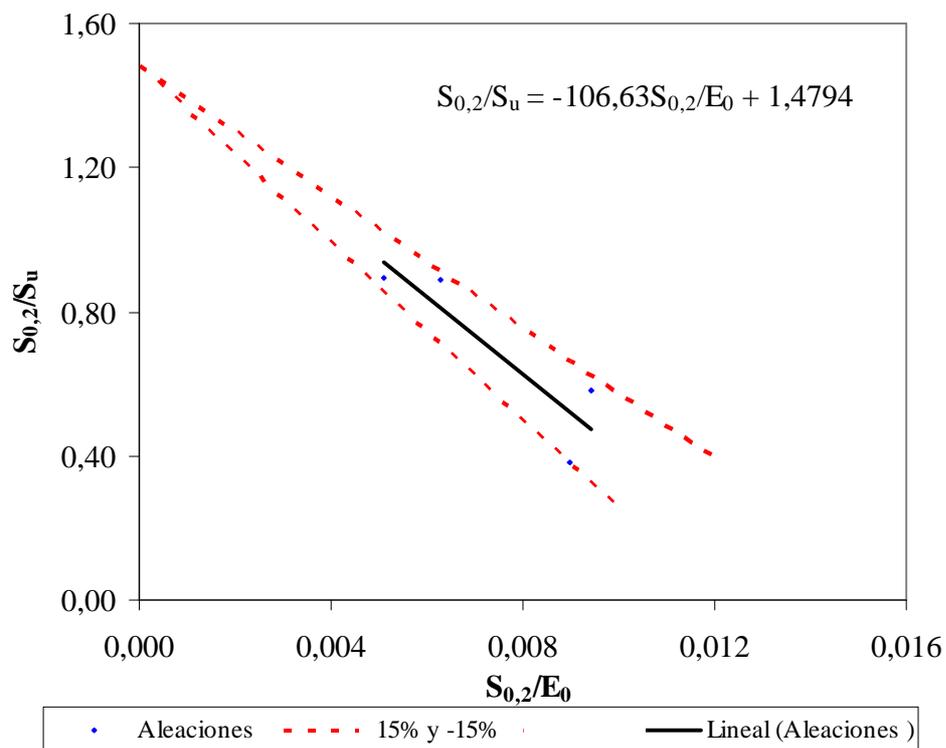


Figura 4.13 Ajuste lineal para esfuerzo último  $S_u$  aleación AA-1050.



Para definir el error máximo en la determinación de la correlación, se trazaron dos líneas de variabilidad, las cuales se hicieron modificando su amplitud hasta obtener la mayor cantidad de puntos de la aleación 1050 dentro, esto se determinó a un  $\pm 15\%$  de error de dispersión con respecto a la línea de tendencia de las aleaciones ajustadas.

Para ajustar la correlación que define  $e_u$  se obtuvo la expresión de la *Ecuación 4.6*:

$$e_u = 0,4 + 0,12 \left( \frac{S_{0,2}}{S_u} \right) \quad \text{Ecuación 4.6}$$

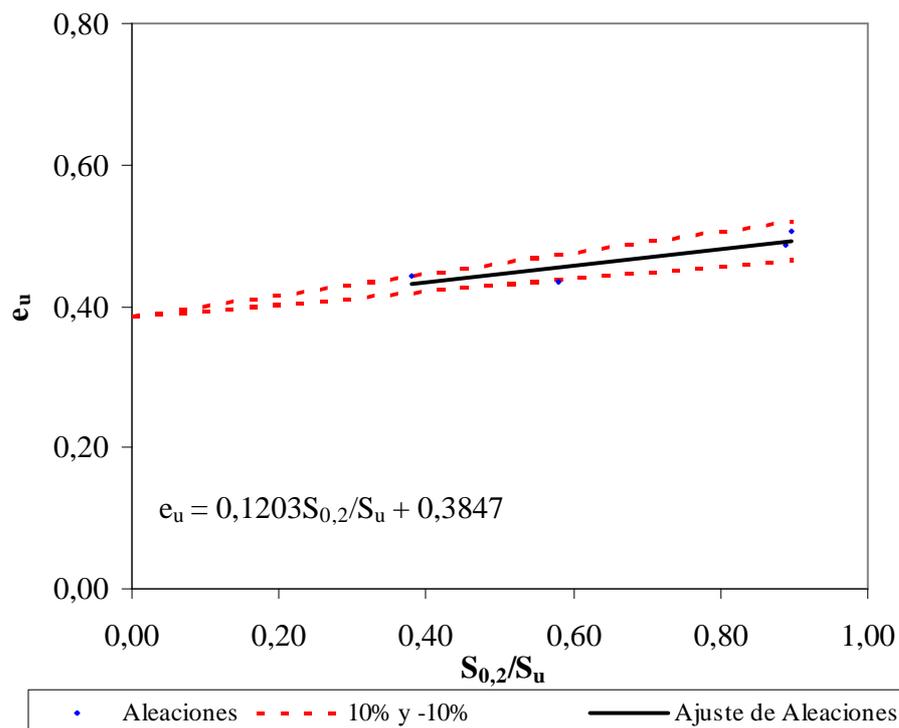


Figura 4.14 Ajuste lineal para deformación última  $e_u$  aleación AA-1050.

Las líneas de desviación de  $e_u$  que engloban la mayor cantidad de puntos de la aleación AA-1050 dentro resultó ser de  $\pm 10\%$  *Figura 4.15*.



---

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

La expresión ajustada  $m$  para las aleaciones AA-1100 y AA-1350 (*Ecuación 4.1* y *Figura 4.1*) presenta un coeficiente de correlación de 76%, lo que indica que la correlación hallada es aceptable.

Al comparar las curvas experimentales y las propuestas obtenidas del ajuste de  $m$  se observa dispersión en la AA-1100 *Figuras 4.2 a 4.5*, debido a que para el cálculo de la curva propuesta se utilizó el ajuste de lo mínimos cuadrados no lineal, que depende de la forma geométrica de la curva, es decir, de los ensayos realizados y estos fueron irregulares, ya que el material es muy blando y las probetas ensayadas tenían espesores muy pequeños. La composición química de las aleaciones afecta sus propiedades mecánicas, la presencia de hierro en la AA-1100 le otorga un aumento ligero de la resistencia a la tracción, fluencia y alargamiento a cambio del incremento de su densidad, lo que repercute directamente sobre el ajuste.

Al observar la curva propuesta y la curva experimental de la AA-1350 el ajuste es excelente (*Figura 4.4* y *Figura 4.5* o *Apéndice A*) tanto en la zona elástica como en la zona plástica.

Se procedió a validar la ecuación del parámetro  $m$  (*Ecuación 4.1*) con la aleación AA-1050 obtenidas experimentalmente observando un comportamiento excelente tanto en la zona elástica como en la plástica, arrojando un coeficiente de correlación superior al 99% (*Figura 4.6* y *Figura 4.7* o *Apéndice A*) lo que se considera excelente; mientras que las recopiladas de la literatura (*Figura 4.8* y *Figura 4.9* o *Apéndice A*) presentan mucha dispersión, debido a que las curvas se obtuvieron de probetas que fueron calentadas durante el ensayo, y este aumento de la temperatura afecta directamente el comportamiento mecánico del material.



---

La probeta AA-1050-T-50-1 fue ensayada con un ligero aumento de la temperatura lo que produce un aumento en la resistencia a la fluencia y el límite elástico del material; mientras la probeta AA-1050-T-50-2 fue ensayada a una temperatura de 227°C lo que origina una disminución considerable en las propiedades mecánicas del material, ya que la mayor deformación es experimentada en la zona plástica. [4]

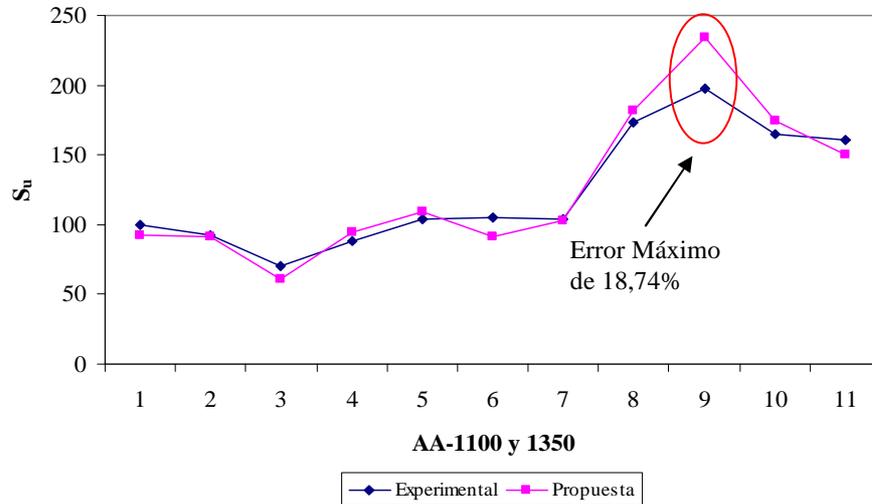
Por otro lado, las aleaciones AA-1050 y AA-1350 se diferencian entre sí porque en las últimas se tiene control sobre tres impurezas individuales, es decir, se limita severamente la cantidad de Ti, Cr y Mn, elementos que modifican la resistencia mecánica del material. [4].

Los valores obtenidos del parámetro  $m$  de la ecuación de Rasmussen con la aleación AA-1050 para la validación (*Tabla 4.4*), arrojaron un error de 78%, al tomar sus puntos más alejados.

Por lo antes expuesto fue necesario hallar una ecuación del parámetro  $m$  independiente para la aleación AA-1050, el coeficiente de correlación obtenido para dicha ecuación (*Ecuación 4.2*) fue de 95% lo que determina que el ajuste para esta aleación es excelente.

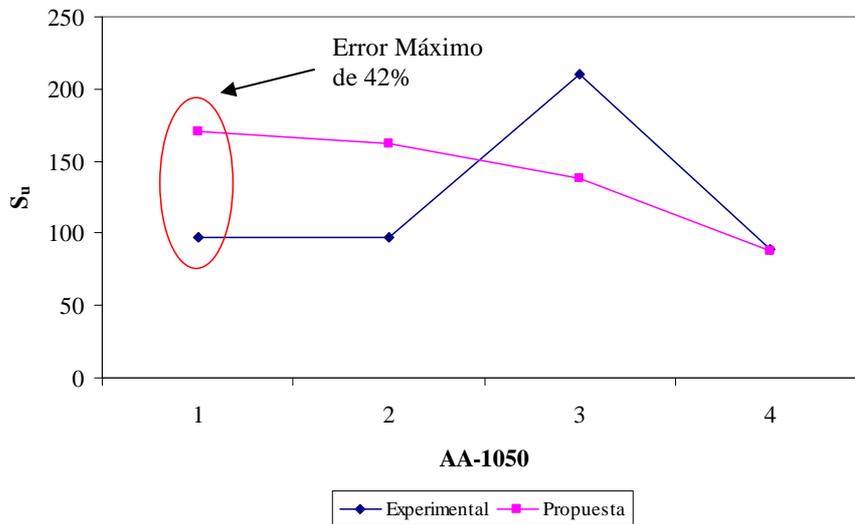
En cuanto a la correlación obtenida para  $S_u$  se observa que el coeficiente de correlación es de 75% y para  $e_u$  es de 70%.

Para comparar el ajuste de las correlaciones halladas, se graficó el esfuerzo último  $S_u$  experimental y propuesto (*Ecuación 4.3*) para las aleaciones AA-1100 y AA-1350; en la gráfica se aprecia que existen pocas diferencias, el mayor error que se observa es de 18,74% como se muestra en la *Figura 5.1*



**Figura 5.1 Comparación del esfuerzo último propuesto y experimental para las aleaciones AA-1100 y AA-1350.**

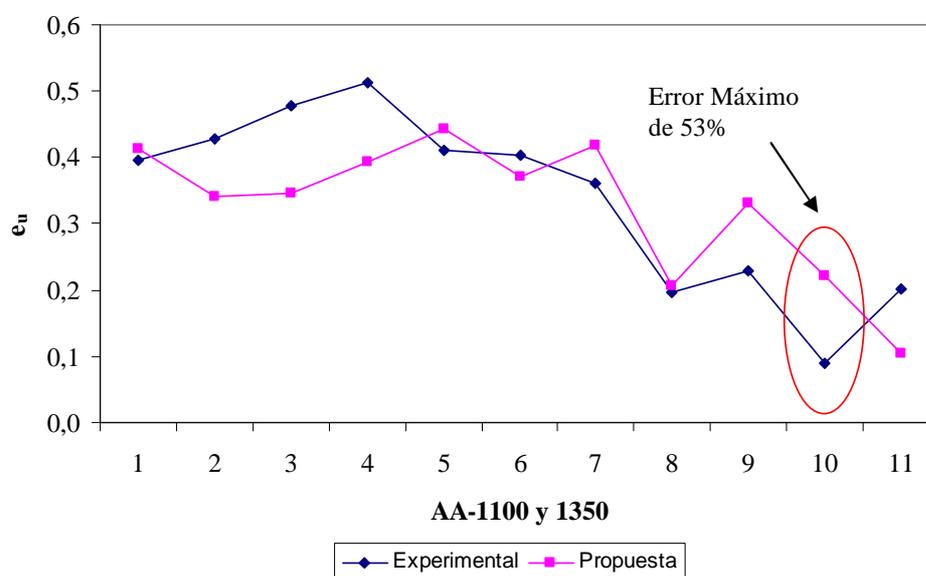
En la *Figura 5.2*, se observa la comparación de la correlación del esfuerzo último  $S_u$  (Ecuación 4.3) aplicada a la aleación AA-1050, donde se aprecia un error de 42%.



**Figura 5.2 Comparación de correlación  $S_u$  propuesto general y. experimental para la aleación AA-1050**



Igualmente se hizo uso de gráficas comparativas que describen el comportamiento de la deformación última (*Ecuación 4.4*) para las aleaciones de aluminio utilizadas en el ajuste, observándose mucha similitud, aquí el error máximo presentado es de 53% entre los puntos mas alejados, como se observa en la *Figura 5.3*, lo que indica que la correlación es moderada.



**Figura 5.3 Comparación de la deformación última propuesta y experimental para aleaciones de las AA-1100 y AA-1350.**

Al igual que para  $S_u$ , se realizó la comparación de la *Ecuación 4.4*, con la aleación AA-1050 y se comparan la Curva experimental Vs. Curva propuesta como se muestra en la *Figura 5.4*, observándose un error en los puntos mas alejados de 90%

Debido a que los errores fueron tan altos en las correlaciones de  $S_u$  y  $e_u$  (42% y 90% respectivamente) para la aleación AA-1050 fue necesarios obtener correlaciones independientes para esta aleación, lo cual dio como resultado un coeficiente de correlación para  $S_u$  y  $e_u$  de 80% para ambos casos considerándose un ajuste aceptable. (ver *Figura 4.13* y *Figura 4.14*)

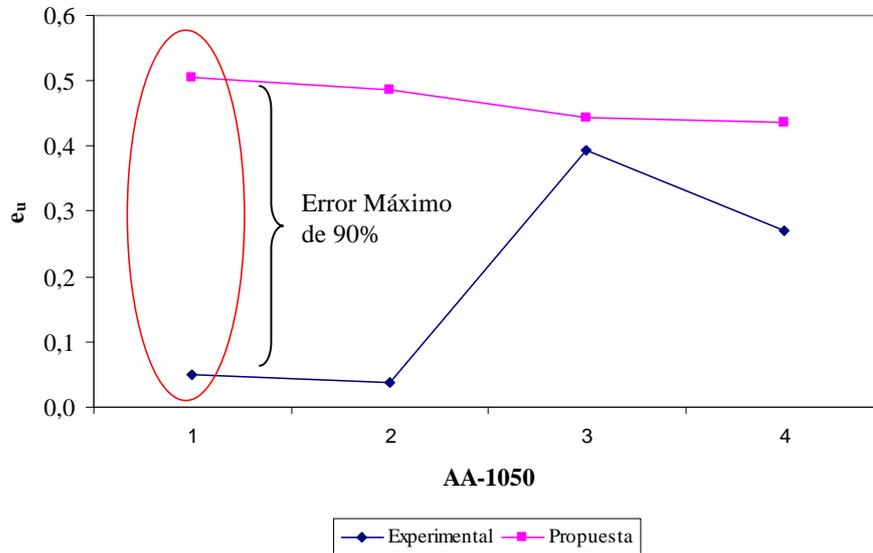


Figura 5.4 Comparación entre la deformación última propuesta y experimental para la AA-1050

En la *Figura 5.5* se muestra la comparación entre el esfuerzo  $S_u$  propuesto y el experimental derivadas de las correlaciones independientes halladas (*Ecuación 4.5*) para la aleación AA-1050 la cual arrojo un error máximo de 27%.

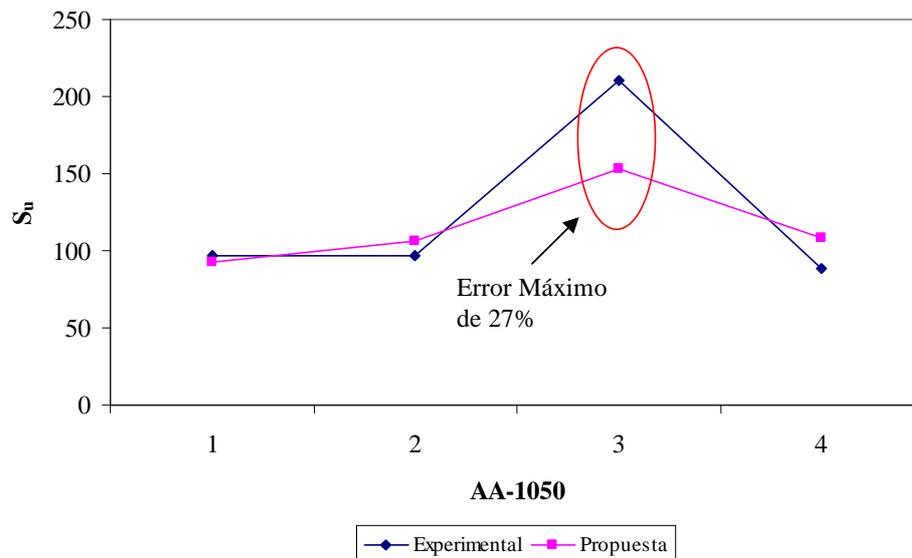
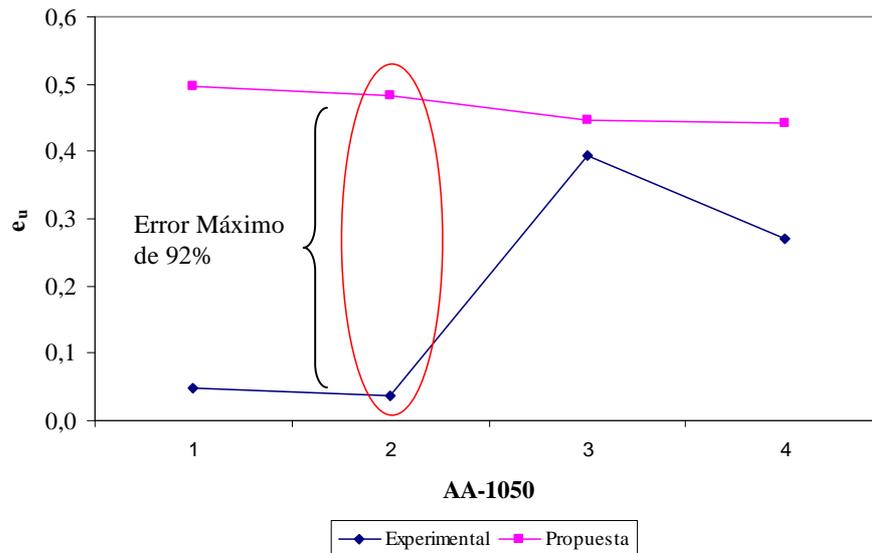


Figura 5.5 Comparación entre el esfuerzo último propuesto y experimental para la AA-1050



En la *Figura 5.6* se muestra la comparación entre la deformación  $e_u$  propuesta y la experimental derivada de las correlaciones independientes (*Ecuación 4.6*) halladas para la aleación AA-1050 las cuales emitieron un error máximo de 92%.



**Figura 5.6** Comparación entre la deformación última propuesta y experimental para la AA-1050

Este último error refleja que no se pudo hallar una correlación satisfactoria para la deformación última  $e_u$  esto en el caso de la aleación AA-1050, para lo cual sería necesario contar con más cantidad de curvas que describan el comportamiento de esta aleación bien sea por medio de ensayos y recopilación de la literatura.



---

## CONCLUSIONES

- El exponente  $m$  de la ecuación de Rasmussen ajustado para las aleaciones de aluminio AA-1100 y AA-1350 arrojó una buena aproximación, presentando un coeficiente de correlación de 76% lo que refleja que el ajuste es aceptable, al validar dicha ecuación con la aleación AA-1050 se obtuvo un error de 77% razón por la cual fue necesario hallar una expresión independiente para esta aleación, esta otra mostró un coeficiente de correlación superior al 95%, lo que se traduce en un ajuste excelente.
- La correlación  $S_u$  propuesta por Rasmussen para las aleaciones de aluminio AA-1100 y AA-1350, presentó una desviación de  $\pm 50\%$  en dicha correlación, lo que indica que esta es moderada y un error que no supera el 19% entre los valores experimentales y propuestos. Al aplicar posteriormente la correlación a la aleación AA-1050 se obtuvo un error porcentual de 42% por lo que fue preciso determinar una expresión particularizada para esta aleación, mostrando un coeficiente de correlación superior al 80%, que lo convierte en un ajuste aceptable.
- Para la correlación  $e_u$  propuesta por Rasmussen para las aleaciones de aluminio AA-1100 y AA-1350, se obtuvo una desviación de  $\pm 25\%$ , lo que muestra que la correlación es aceptable, con un error inferior al 53% entre la data propuesta y experimental. Empleando esta correlación a la aleación AA-1050 se determinó un error porcentual de 90% razón por la cual fue idóneo establecer una expresión independiente para esta aleación, la cual arrojó un coeficiente de correlación superior al 80%, lo que se traduce en un ajuste aceptable.



- 
- Las correlaciones halladas de  $S_u$  y  $e_u$  solo para las aleación AA-1050, alcanzaron un máximo de desviación de  $\pm 15\%$  y  $\pm 10\%$  respectivamente, mostrando un coeficiente de correlación superior al 80% para ambos casos y comparando los valores experimentales Vs propuestos de  $S_u$  y  $e_u$  se determinó un error porcentual de 27% y 90% respectivamente. Este último parámetro no fue posible ajustarlo para la aleación AA-1050 de la data disponible estudiada.
  - El mejor ajuste logrado del parámetro  $m$  que define la forma del codo en la curva esfuerzo-deformación de la ecuación de Rasmussen fue con la aleación AA-1350 lo cual se reflejo tanto en la zona elástica como plástica.



## **RECOMENDACIONES**

- Para obtener resultados más confiables en los ajustes de los parámetros y correlaciones estudiadas en esta investigación se requiere de mayor cantidad de ensayos que ofrezca una población variada en cuanto a condiciones y propiedades iniciales del material.
- Se puede también hacer uso de otros modelos matemáticos que describen el comportamiento de la curva esfuerzo-deformación como por ejemplo los de Nederco y Abdella a fin de comparar y determinar con cual se obtiene mejores resultados.
- Es conveniente trabajar con más aleaciones de esta serie una de ellas puede ser AA-1070, como también aleaciones de otras series por ejemplo 4XXX, 5XXX, 7XXX y 9XXX las cuales no se han estudiado hasta ahora, en la búsqueda incesante de predecir el comportamiento mecánico de este material.



---

## REFERENCIAS

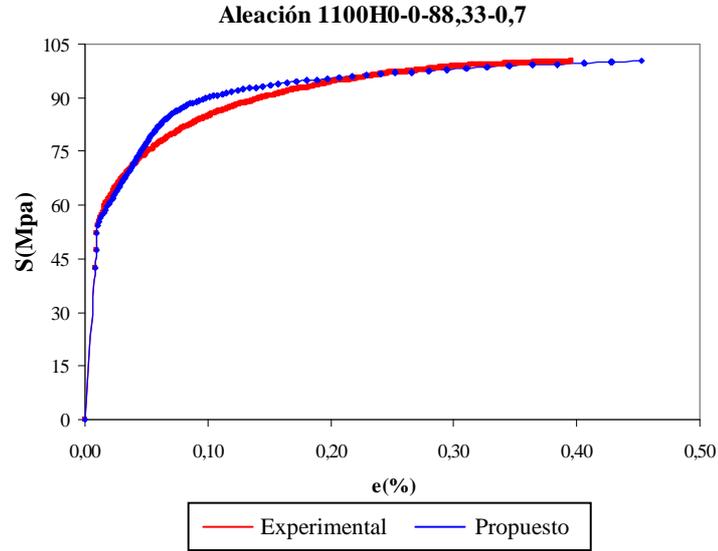
- [1] Abdella K. (2006). "Abdella An Explicit Formulation For Stainless Steel Applicable In Tension And Compression Journal of Constructional Steel". Article in Press.
- [2] America Society for Testing and Materials. (1998). Manual Book of ASTM Standards Easton, M.D. U.S.A.
- [3] Aluminium Association. (1998). Manual Aluminium Standars and data. U.S.A.
- [4] Askeland R. (1996). "The Science and Engineering of Materials". 3th edition, pp 401-412
- [5] Ciaccia M., Aparicio G., D' Armas H. (2006). "Ajuste de los parámetros de Parámetros de las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen par alas aleaciones de aluminio 8011 y 3003". VI Congreso Bi-Nacional de Metalurgia y Materiales CONAMET SAM 2006, Santiago de Chile, Chile, 2006.
- [6] Ciaccia M., Aparicio G., D' Armas H. (2006). "Comportamiento Elastoplástico en Tracción de Láminas de Acero ASTM A 569". Revista ingeniería UC.
- [7] Ciaccia M., Aparicio G., Tinedo R., Potenza G., D' Armas H. (2007). "Ajuste de la ecuación de Rasmussen para las aleaciones de aluminio 2024, 3003, 6061 y 6063". VIII Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica CIBIM8, Peru, 2007.
- [8] Hill H. (1945). "Determination Of Stress-Strain Relation From Offset Yield Strength Values". NACA, T. N. N° 927.
- [9] Macdonald M., Rhodes J., Taylor G. (2000). "Mechanical properties of Stainless Steel Lipped Channels". 15<sup>th</sup> International Speciality Confereced of Cold Formed Steel Structures, Eds RA LaBoube and W-W Yu, University of Missouri-Rolla, pp. 673-686.
- [10] Mata D., Kazmier L. (1998). "Estadísticas Aplicada a la Administración y Economía". 5ta edición, McGraw Hill.



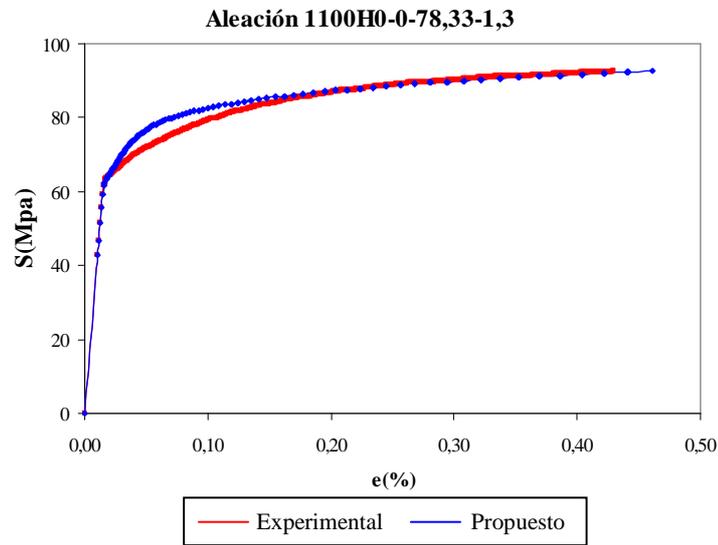
- 
- [11] Olsson A. (2001). “Steel Plasticity-Material Modelling and Structural Application”. PhD thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Lulea University of Technology, Sweden.
- [12] Potenza G., Tinedo R. (2007). “Evaluación del Comportamiento Elastoplástico en Tracción para Láminas de Aluminio”. Trabajo de Grado Universidad de Carabobo.
- [13] Ramberg W., Osgood W. (1943). “Description Of Stress-Strain Curves By Three Parameters”. NACA, T. N. N° 902.
- [14] Rasmussen K. (2003). “Full-Range Stress-Strain Curves For Stainless Steel Alloys”. *Journal of Constructional Steel*, vol. 59, pp. 47-61.
- [15] Real E., Mirambell E. (2003). “Discussion of Full-Range Stress-Strain Curves For Stainless Steel Alloys [Journal of constructional steel research 2003; 59: 47-61]”. *Journal of Constructional Steel*, vol. 59, pp. 1321-1323.

# **APÉNDICE**

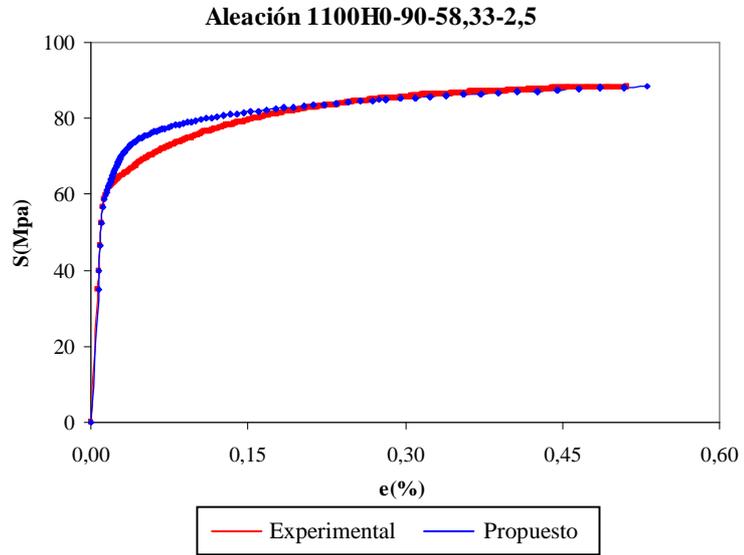
## APENDICE A



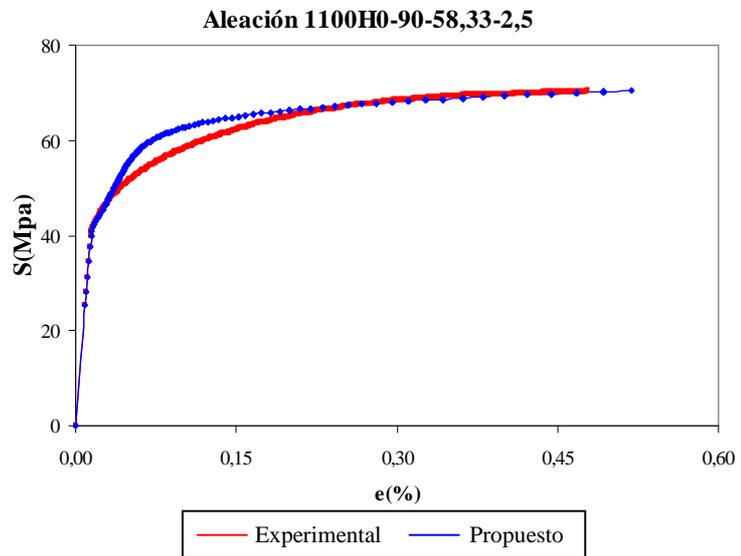
**Curvas Esfuerzo-Deformación Ingenieril Propuestas y Experimentales de AA-1100-H0-0-88,33-0,7**



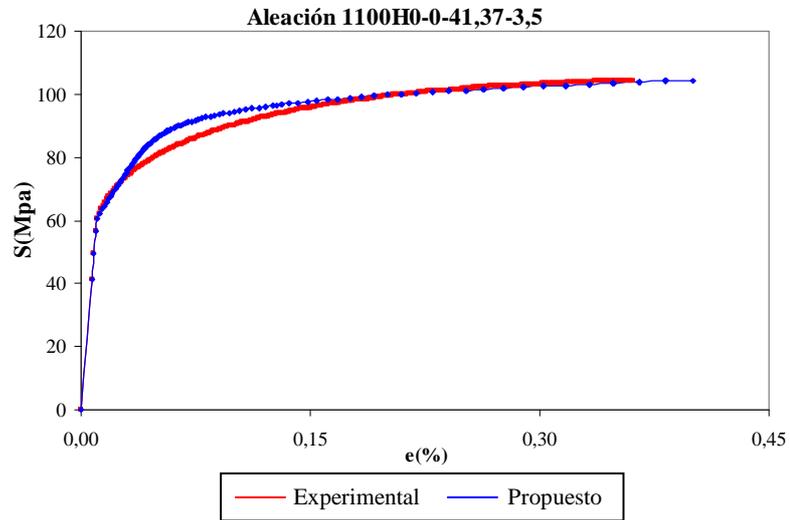
**Curvas Esfuerzo-Deformación Ingenieril Propuestas y Experimentales de AA-1100-H0-0-78,33-1,3**



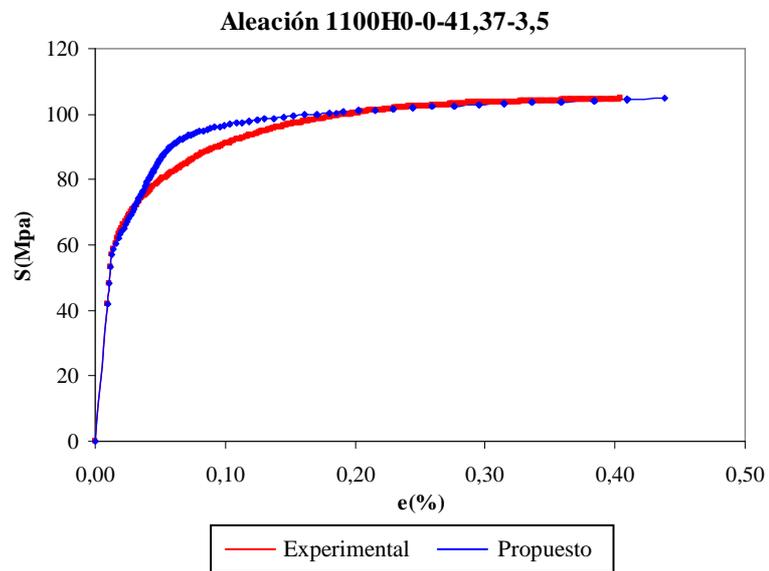
**Curvas Esfuerzo-Deformación Ingenieril Propuestas y Experimentales de AA-1100-H0-90-58,33-2.5-1**



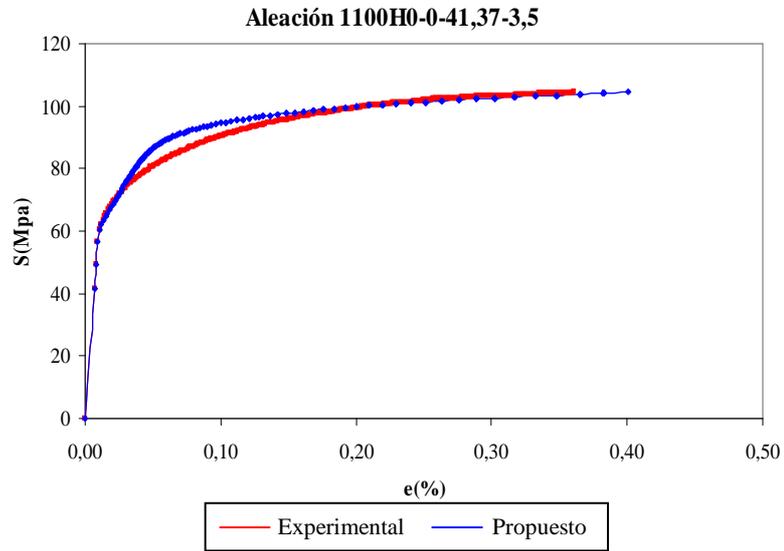
**Curvas Esfuerzo-Deformación Ingenieril Propuestas y Experimentales de AA-1100-H0-90-58,33-2.5-2**



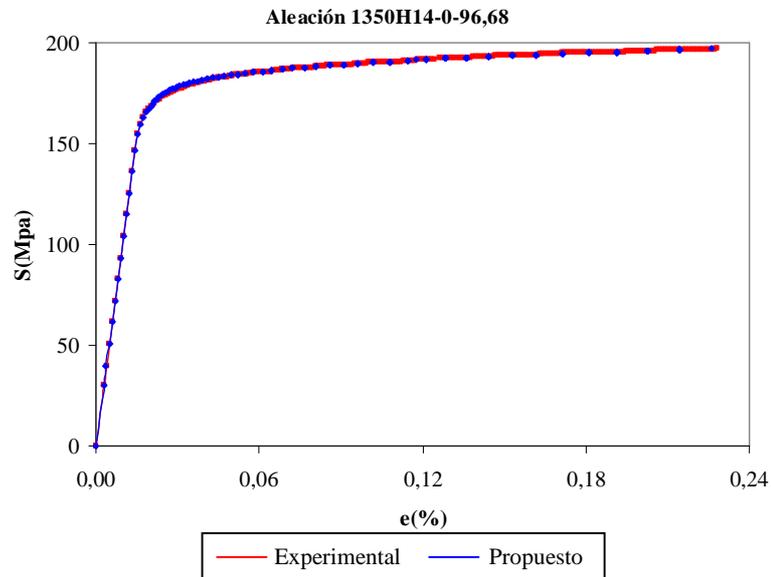
**Curvas Esfuerzo-Deformación Ingenieril Propuestas y Experimentales de AA-1100-H0-0-58.33-3,5-1**



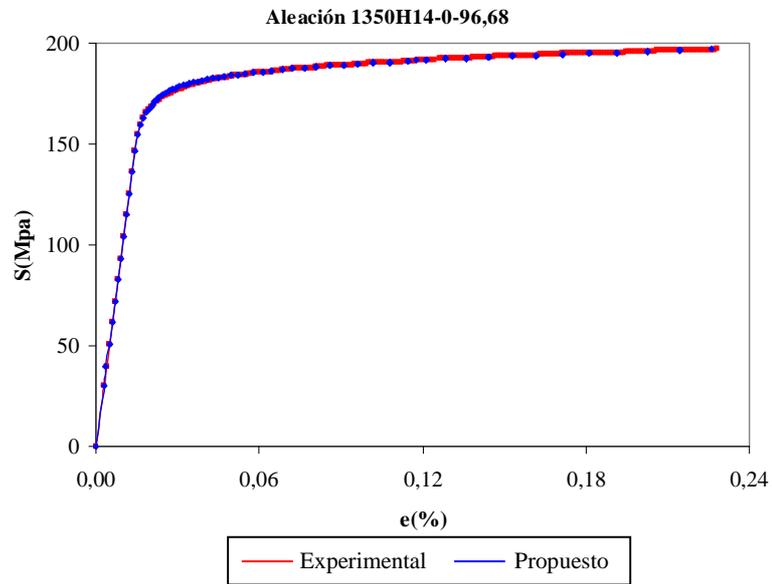
**Curvas Esfuerzo-Deformación Ingenieril Propuestas y Experimentales de AA-1100-H0-0-58.33-3,5-2**



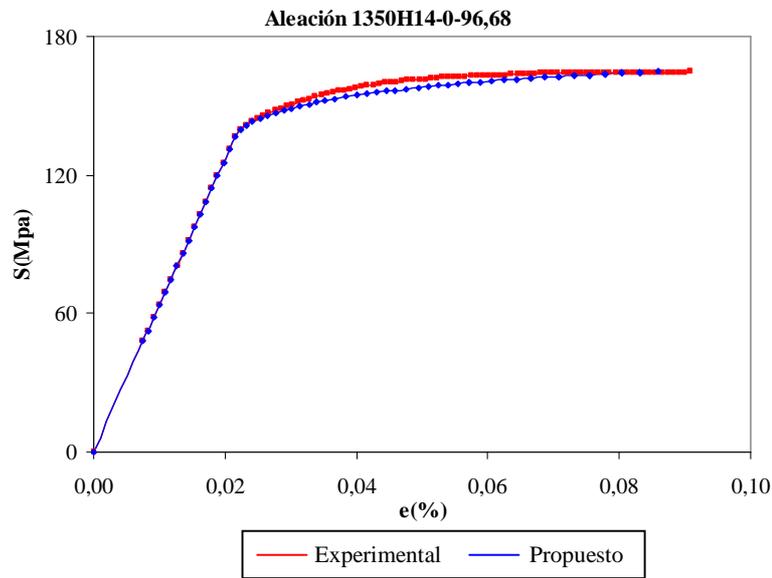
**Curvas Esfuerzo-Deformación Ingenieril Propuestas y Experimentales de AA-1100-H0-0-58.33-3,5-3**



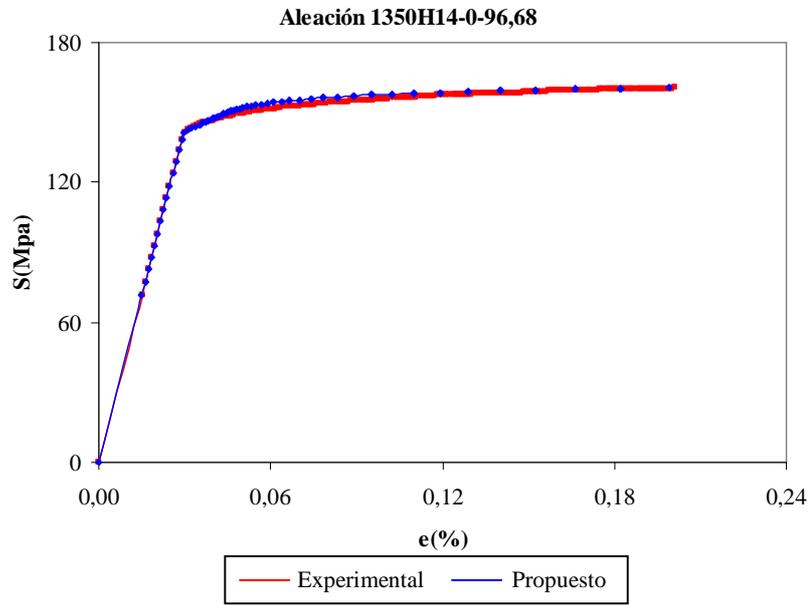
**Curvas Esfuerzo-Deformación Ingenieril Propuestas y Experimentales de AA-1350-H14-0-96.68**



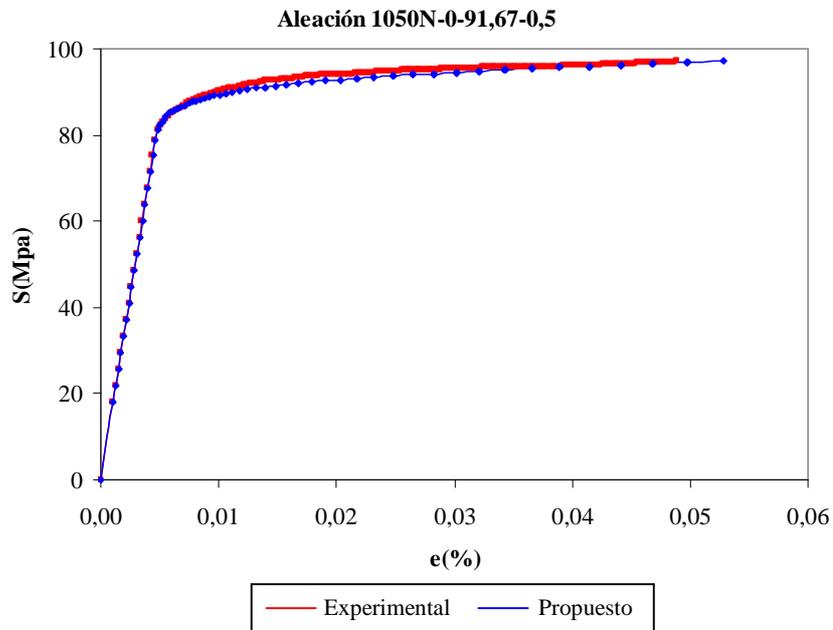
**Curvas Esfuerzo-Deformación Ingenieril Propuestas y Experimentales de AA-1350-H14-0-96.68-2**



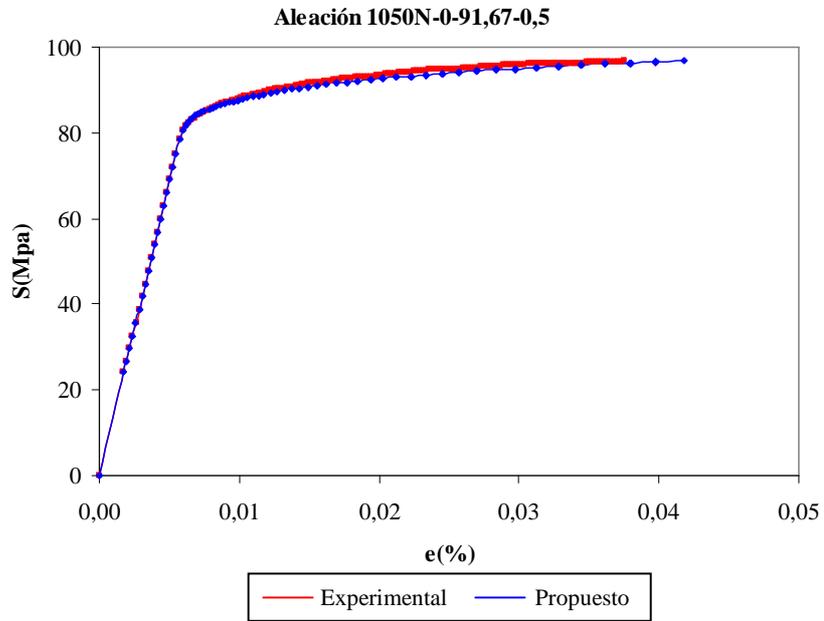
**Curvas Esfuerzo-Deformación Ingenieril Propuestas y Experimentales de AA-1350-H14-0-96.68-3**



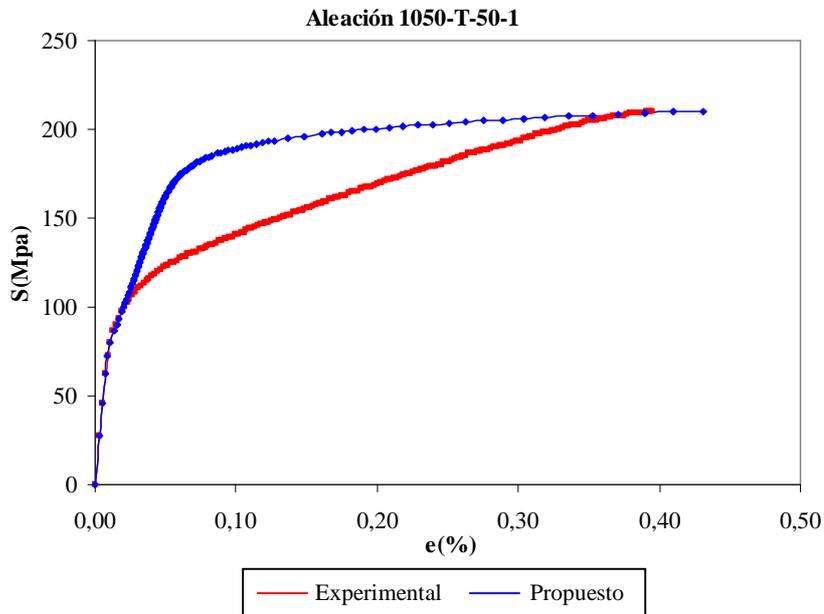
**Curvas Esfuerzo-Deformación Ingenieril Propuestas y Experimentales de AA-1350-H14-0-96.68-4**



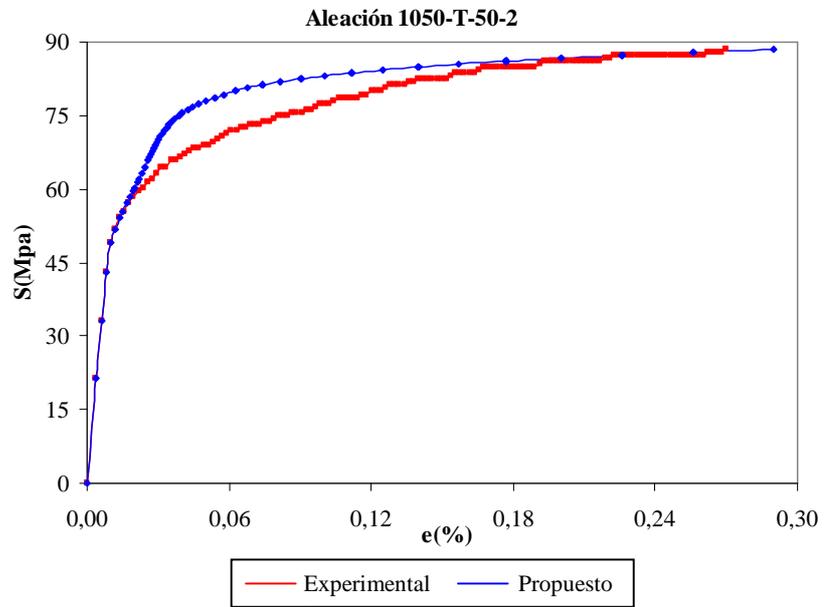
**Curvas esfuerzo-deformación ingenieril experimentales y propuestas.**



**Curvas esfuerzo-deformación ingenieril experimentales y propuestas.**



**Curvas esfuerzo-deformación ingenieril experimentales y propuestas.**



**Curvas esfuerzo-deformación ingenieril experimentales y propuestas.**