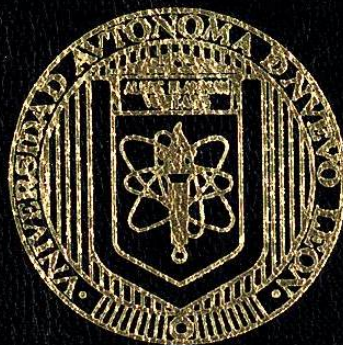


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



COMPORTAMIENTO DE UNA ALEACION DE
ALUMINIO TRATADA TERMICAMENTE
BAJO CARGA DE COMPRESION

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA
ING. MA. DE JESUS NAÑEZ RODRIGUEZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

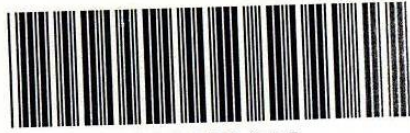
JUNIO DE 1998

TM
Z5853
.M2
FIME
1998
N3

COMPORTEAMIENTO DE UNA ALEACION DE ALUMINIO
TRATADA TERMICAMENTE BAJO CARGA DE COMPRESION

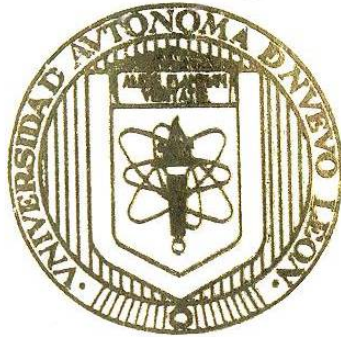
M.J.N.R.

1998



1020123025

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



COMPORTAMIENTO DE UNA ALEACION DE
ALUMINIO TRATADA TERMICAMENTE
BAJO CARGA DE COMPRESION

T E S I S

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA
ING. MA. DE JESUS NAÑEZ RODRIGUEZ

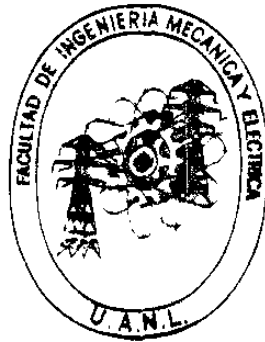
SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. JUNIO DE 1998

TM
ZS253
Mc
FINE
1992
N3

0119-20160



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



COMPORTAMIENTO DE UNA ALEACION DE
ALUMINIO TRATADA TERMICAMENTE
BAJO CARGA DE COMPRESION

T E S I S

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA
ING. MA. DE JESUS NAÑEZ RODRIGUEZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. JUNIO DE 1998

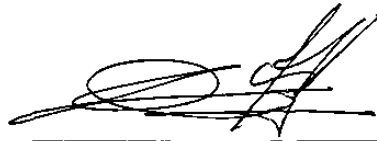


FONDO
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Comportamiento de una aleación de aluminio tratada térmicamente bajo carga de compresión” realizada por Ma. de Jesús Nañez Rodríguez sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Mecánica con Especialidad en Materiales.

El comité de Tesis



DR. José Luis Cavazos García
Asesor



M.C. Paulino Flores Saavedra
Coasesor



M.C. Buenaventura Flores Rodz.
Coasesor



VoBo
M.C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Post-grado

San Nicolás de los Garza N.L. , Junio de 1998

DEDICATORIAS

A la memoria de mi **MADRE**

A mi querido **PADRE**

A mi perfecto compañero en la vida **ANTONIO** la mitad de mi existencia

A la otra mitad de mi existencia **ADRIÁN, MARA, CLAUDIA Y SOFÍA**

Con mucho cariño a mis **HERMANOS**

Leticia y Fernando

Raúl y Nora

Laura y Jesús

Nancy y Manuel

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a **DIOS** nuestro señor el haberme otorgado con la gracia de vida y el don del pensamiento

A la acertada guía del asesor **DR. JOSÉ LUIS CAVAZOS GARCÍA**, a su paciencia y dedicación se dirige mi más profundo agradecimiento.

A los coasesores **M.C. PAULINO FLORES SAAVEDRA Y M.C. BUENAVENTURA FLORES RODRÍGUEZ** por sus valiosas observaciones.

A todos los que forman el **DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MATERIALES** de la **F.I.M.E.**

A todos los **MAESTROS** por la transmisión generosa de su saber.

Mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me brindaron su ayuda y apoyo en especial a:

Ing. Lorenzo Vela Peña
Ing. José Antonio González Treviño
Ing. Cástulo E. Vela Villarreal
Dra. Martha Patricia Guerrero Mata
M.C. Daniel Ramirez Villarreal
Dr. Moisés Hinojosa Rivera
M.C. Gregorio López Lom
Lic. Joaquin Luna Salinas
Oscar Flores Balderas

INDICE

DEDICATORIAS	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	1
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	2
CAPITULO 2. ALUMINIO Y SUS ALEACIONES	4
2.1 Introducción	4
2.2 Propiedades del aluminio	5
2.3 Aleaciones de aluminio	7
2.4 Clasificación de las aleaciones de aluminio	8
2.4.1. Aleaciones trabajadas	9
2.4.2. Aleaciones vaciadas	10
2.5 Designación de los tratamientos para el aluminio y sus aleaciones	11
CAPITULO 3. TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN ALEACIONES DE ALUMINIO	12
3.1 Introducción	12
3.2 Tratamientos térmicos en aleaciones de aluminio	12
3.2.1. Tratamiento térmico de solubilización	15
3.2.2. Enfriamiento rápido	16
3.2.3. Tratamiento por precipitación o envejecido	17
3.3 Mecanismos de endurecimiento	

3.3.1. Endurecimiento en aleaciones no-tratables térmicamente	21
3.3.2. Aleaciones tratables térmicamente	22
3.4 Secuencia de precipitación en aleaciones de aluminio de la serie 6000	22
3.5 Aleaciones Al-Mg-Si serie 6000	23
3.6 Propiedades de la aleación 6063 (0.7 Mg-0.4 Si)	25

CAPITULO 4. ENSAYO DE COMPRESIÓN AXIAL 26

4.1 Introducción	26
4.2 Requisito para ser un elemento a compresión	27
4.3 Forma de las probetas	28
4.3.1. Probetas de forma cilíndrica	28
4.3.2. Probetas rectangulares	29
4.4 Precauciones al hacer el ensayo	29
4.5 Gráfica esfuerzo-deformación	30
4.5.1. Gráfica ingenieril	30
4.5.2. Gráfica real	31
4.6 Limitaciones al hacer el ensayo	33
4.7 Propiedades que se obtienen	33
4.8 Reducción de la fricción	34
4.9 Fractura en compresión	35
4.10 Coeficiente de ovalidad	36
4.11 Coeficiente de altura	37

CAPITULO 5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 38

5.1 Introducción	38
5.2 Caracterización de la aleación	38
5.2.1. Composición química	39
5.2.2. Microestructura	39
5.3 Preparación de la muestra	41
5.4 Tratamiento térmico	41
5.4.1. Tratamiento de solubilización	42
5.4.2. Enfriamiento rápido	43
5.4.3. Tratamiento de envejecido	43
5.4.4. Tratamiento de sobre-envejecido	44
5.5 Microdureza	45
5.6 Ensayos de compresión	45

CAPITULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
6.1 Introducción	46
6.2 Microdureza	46
6.3 Ensayos de compresión	48
6.3.1. Gráficas esfuerzo deformación ingenieriles	49
6.3.2. Gráficas esfuerzo-deformacion reales	50
6.3.3. Comparación entre las gráficas esfuerzo-deformación reales e ingenieriles.	50
6.4 Análisis de gráficas	54
6.5 Coeficiente de altura (H)	56
CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	60
APÉNDICE A GRÁFICAS ESFUERZO DEFORMACIÓN	62
APÉNDICE B GLOSARIO	69
LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS	73
REFERENCIAS	76
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	79

RESUMEN

A partir de una barra extruida de aluminio 6063-T6, se maquinaron muestras cilíndricas, una parte se sometió a tratamiento térmico de solubilización y enfriamiento rápido, envejecido y sobre-envejecido, logrando así muestras en condiciones de sobresaturado, máxima dureza y sobre-envejecido. Se procedió a realizar ensayos de dureza y compresión. En los ensayos de dureza, el valor más alto correspondió a la condición de máxima dureza, valores intermedios para las condiciones de extruida y sobre-envejecido y el mínimo a la condición de sobresaturado. Con los valores de carga y deformación registrados en los ensayos de compresión se obtuvieron las gráficas de esfuerzo-deformación reales e ingenieriles, en ellas se determinó por el método offset la resistencia a la cedencia de cada una de las condiciones, la condición de máxima dureza tiene la resistencia más alta y la más baja corresponde a la condición de sobresaturado. En las condiciones de máxima dureza, extruida y sobre-envejecido el esfuerzo de flujo plástico es casi constante y en la sobresaturada se incrementa continuamente, esto se debe a que los precipitados en las primeras condiciones son incoherentes y en la sobresaturada no existen.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

El aluminio es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre, posee una combinación de propiedades que lo convierten en un material muy útil, tiene baja densidad, buena resistencia a la corrosión debido a la película de óxido que se forma en su superficie, excelente conductividad eléctrica y térmica, no es tóxico por lo que se utiliza ampliamente para contener alimentos, es suave y dúctil. El precio relativamente bajo y sus propiedades hacen de éste metal uno de los más importantes a nivel industrial. El aluminio puro tiene poca resistencia mecánica, por lo que se puede alea con otros elementos para aumentarla.

Algunas aleaciones de aluminio pueden mejorar sus propiedades mecánicas por medio de un tratamiento térmico conocido como

etapas: tratamiento de solubilización, enfriamiento rápido y endurecimiento por precipitación.

El efecto del envejecimiento en la resistencia mecánica de una aleación endurecida por precipitación está en función del tiempo y la temperatura, a medida que se incrementa el tiempo de envejecido a una temperatura determinada la aleación se hace más resistente hasta un punto máximo , si el envejecimiento continúa la aleación se sobreenejece y disminuye su resistencia.

Las aleaciones de aluminio se trabajan mecánicamente con facilidad ya sea en frío o a temperaturas elevadas, en cualquier caso se requieren grandes cargas de compresión para convertirlas en formas usuales como chapa, lámina, extrusiones, varilla y alambre. Una analogía para éste tipo de procesos de formado es el ensayo de compresión que determina la magnitud del esfuerzo requerido para que el material trabaje plásticamente.

El objetivo de este trabajo es analizar como influye el tratamiento térmico en una aleación de aluminio cuando se le aplica un esfuerzo de flujo negativo a baja velocidad.

CAPITULO 2

ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

2.1.- Introducción.

De los metales no ferrosos, el aluminio es el más importante en la vida moderna, esto se debe a sus tres características principales que son:

- a) Bajo peso específico
- b) Resistencia a la corrosión
- c) Buena conductividad eléctrica y térmica

El aluminio fué descubierto como elemento en Inglaterra por el químico Sir Humphrey Davey en el año de 1807, en 1845 el físico alemán Friedrich Wohler determinó la gravedad específica, ductilidad y otras propiedades (Ref. 1), fué hasta el año de 1855 cuando el aluminio se comercializó.

2.2.- Propiedades del aluminio.

El aluminio es un metal de color blanco argentado, levemente azulado y con un brillo fuerte, es dúctil y maleable lo que permite laminarlo en chapas y láminas delgadas o estirarlo en forma de alambre.

El aluminio es un metal ligero, su densidad es de 2.7 gr./cm^3 y el de sus aleaciones de 2.56 a 2.95 gr./cm^3 o sea un tercio de la densidad del acero. Es resistente a la corrosión, esta propiedad se debe a la formación de una película superficial de óxido de aluminio (Al_2O_3) que actúa como una pintura natural, impidiendo cualquier ataque de la intemperie, como agua, agua salada, petroquímicos etc. Algunas aleaciones de aluminio se someten a ciertos tratamientos especiales con el fin de aumentar la resistencia a la corrosión, dos de estos tratamientos son el alclad y el anodizado Tabla 1 (Ref.2).

Ocupa el 4° lugar entre los mejores conductores de la electricidad, superado solamente por la plata, el oro y el cobre. Aunque la conductividad eléctrica del aluminio es aproximadamente el 62 % de la del cobre, su poco peso los hace más adecuados en muchos casos para conductores eléctricos. Su alta conductividad térmica ha hecho que el aluminio se use en equipos que requieren de intercambio de calor. En estado de gran pureza se utiliza en los reflectores fotográficos, debido a su gran poder de reflexión de la luz, ya que su superficie no pierde el brillo.

Tabla 1 Resistencia a la corrosión relativa de aleaciones de aluminio

Aleación	Atmósfera no-industrial	Atmósfera Industrial	Atmósfera Marina
1100	A	B	B
2011	B	C	D
2017	A	A	B
2024	B	C	D
Alclad 2024	A	A	B
3003	A	B	B
5005	A	A	A
5052	A	A	A
5083	A	A	A
5086	A	A	A
6061-T6	A	B	B
6063-T5	A	B	B
7075-T6	B	C	D
Alclad 7075-T6	A	B	C

A = Excelente

B = Buena

C = Regular

D = No se recomienda sin un tratamiento superficial adicional

El aluminio es noferromagnético propiedad importante en la industria eléctrica y electrónica, los compuestos que se forman en la superficie del aluminio, por el ataque de otros elementos son incoloros ,atóxicos e inocuos al ser humano, de ahí la gran aplicación que tiene en los utensilios de cocina.

2.3.- Aleaciones de aluminio.

La adición de elementos de aleación se hace para mejorar las propiedades mecánicas, como la resistencia a la tensión, dureza, rigidez, maleabilidad y algunas veces para mejorar la fluidez y otras propiedades de vaciado.

Las aleaciones de aluminio se dividen en dos categorías:

- Trabajadas
- Vaciadas

Las propiedades mecánicas de muchas de ellas se pueden mejorar por mecanismos de endurecimiento basados en la solubilidad de fases, a los cuales responden fácilmente, la Tabla 2 (Ref. 3) compara la resistencia del aluminio puro recocido con aleaciones endurecidas mediante diversas técnicas, las que pueden ser 30 veces más resistentes que el aluminio puro. Algunas aleaciones son no-tratables térmicamente.

<i>Material</i>	<i>Resistencia a la tensión (psi)</i>	<i>Esfuerzo de fluencia (psi)</i>	<i>Elongación (%)</i>	<i>Esfuerzo de fluencia (aleación)</i> <i>Esfuerzo de fluencia (puro)</i>
Aluminio puro recocido (99.999% Al)	6,500	2,500	60	
Aluminio puro comercial (recocido, 99% Al)	13,000	5,000	45	2.0
Endurecido por solución sólida (1.2% Mn)	16,000	6,000	35	2.4
Aluminio puro trabajado en frío un 75%	24,000	22,000	15	8.8
Endurecido por dispersión (5% Mg)	42,000	22,000	35	8.8
Endurecido por envejecimiento (5.6% Zn-2.5% Mg)	83,000	73,000	11	29.2

Tabla 2 Efecto del mecanismo de endurecimiento en el aluminio y en aleaciones de aluminio.

2.4 Clasificación de las aleaciones de aluminio.

Las aleaciones trabajadas se conforman por deformación plástica, tienen composiciones y microestructuras muy diferentes a las aleaciones vaciadas.

La Aluminum Association System es la más reconocida en los Estados Unidos, su sistema de identificación de aleaciones emplea diferentes nomenclaturas para aleaciones trabajadas o vaciadas.

2.4.1. - Aleaciones trabajadas.

Para las aleaciones trabajadas se utiliza un sistema de cuatro dígitos como sigue:

- 1000 para aluminio puro.
- 2000 aleaciones en las que el cobre es el elemento aleante principal.
- 3000 aleaciones en las cuales el manganeso es el elemento aleante principal.
- 4000 aleaciones en las que el silicio es el elemento aleante principal.
- 5000 aleaciones en las que el magnesio es el elemento aleante principal.
- 6000 aleaciones en las cuales el silicio y el magnesio son los principales elementos de aleación.
- 7000 aleaciones en las que el zinc es el elemento principal pero otros elementos como el cobre, magnesio, cromo y zirconio deben especificarse
- 8000 aleaciones que incluyen estaño y algo de litio consideradas composiciones misceláneas
- 9000 reservados para uso futuro

Las aleaciones de la serie 1000 y 3000 son de una sola fase, sus propiedades son controladas por endurecimiento por deformación, solución sólida y por control de tamaño de grano.

Las aleaciones de la serie 4000 contienen dos fases, α y silicio casi puro β . Las aleaciones de la serie 5000 contienen α una solución sólida de magnesio en aluminio la cual se endurece mediante una dispersión fina de Mg_2Al_3 (β). Las aleaciones 2000, 6000 y 7000 son ternarias endurecibles por envejecimiento .

2.4.2.- Aleaciones vaciadas.

Las aleaciones vaciadas se describen por un sistema de tres dígitos seguido por un valor decimal. La decimal .0 pertenece a las aleaciones vaciadas y las decimales .1 y .2 concierne a las composiciones de lingote estándar y no-estándar respectivamente y son :

- 100.0 aluminio puro especialmente para manufactura de rotores.
- 200.0 aleaciones en las que el cobre es el aleante principal, otros elementos aleantes deben especificarse.
- 300.0 aleaciones en las que el silicio es el principal elemento aleante y otros elementos de aleación como cobre y magnesio.
- 400.0 el silicio es el principal elemento de aleación.
- 500.0 el magnesio es el principal elemento de aleación.
- 600.0 sin uso.
- 700.0 el zinc es el principal elemento de aleación , otros elementos como cobre y magnesio deben especificarse.
- 800.0 el estaño es principal elemento de aleación.
- 900.0 sin uso

2.5.- Designación de los tratamientos para el aluminio y sus aleaciones.

El grado de endurecimiento está dado por la designación T o H, dependiendo si la aleación es tratada térmicamente o endurecida por deformación, otras clasificaciones indican si la aleación es recocida (O), tratada por solución (W), o usada en su condición de fabricación (F).

La designación del tipo T, va seguida por un número del 1 al 10, cada número denota la secuencia específica del tratamiento básico como se describe a continuación.

- T1 enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecido natural.
- T2 enfriada desde la temperatura de fabricación , trabajada en frío y envejecido natural.
- T3 tratada por solución, trabajada en frío y envejecido natural.
- T4 tratada por solución y envejecido natural.
- T5 enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecido artificial.
- T6 tratada por solución y envejecido artificial.
- T7 tratada por solución y estabilizada.
- T8 tratada por solución, trabajada en frío y envejecido artificial.
- T9 tratada por solución, envejecido artificial y trabajado en frío.
- T10 enfriada desde la temperatura de fabricación , trabajada en frío y envejecido artificial.

CAPITULO 3

TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN ALEACIONES DE ALUMINIO

3.1.- Introducción.

Tratamiento térmico se refiere a cualquier operación de calentamiento y enfriamiento que se realiza con el propósito de cambiar las propiedades mecánicas, la estructura metalúrgica o el estado de esfuerzos residuales de un producto de metal. Cuando el término se aplica a las aleaciones de aluminio, su uso es frecuentemente restringido a las operaciones específicas empleadas para incrementar la dureza y resistencia de las aleaciones.

3.2.- Tratamientos térmicos en aleaciones de aluminio.

El endurecimiento por precipitación involucra la formación de partículas finas (precipitados) que bloquean el movimiento de las dislocaciones y hacen más resistente al metal. Es el único tratamiento térmico en las aleaciones de aluminio. Para que un sistema de aleación sea

capaz de experimentar el endurecimiento por precipitación, el diagrama de fases debe mostrar en el estado sólido una solubilidad decreciente a medida que la temperatura disminuya, esto es, la aleación debe formar una sola fase al calentarse por encima de la línea solvus y luego pasar a una región bifásica al enfriarse.

El sistema Al-Cu, Fig. 3.1 (Ref. 4) muestra el extremo rico en aluminio del diagrama de fases, si una aleación de Al -4% Cu se calienta por algunas horas a 550 ° C, se obtiene una estructura de una fase, si se baja la temperatura rápidamente será retenida y se obtiene una solución sólida sobresaturada que permanece como fase metaestable, si la aleación se calienta a una temperatura intermedia, la difusión en estado sólido de los átomos del cobre en el aluminio es lo suficientemente rápida para permitir que se forme una fina dispersión de precipitados que son barreras para las dislocaciones y conduciendo a un aumento en resistencia de la aleación.

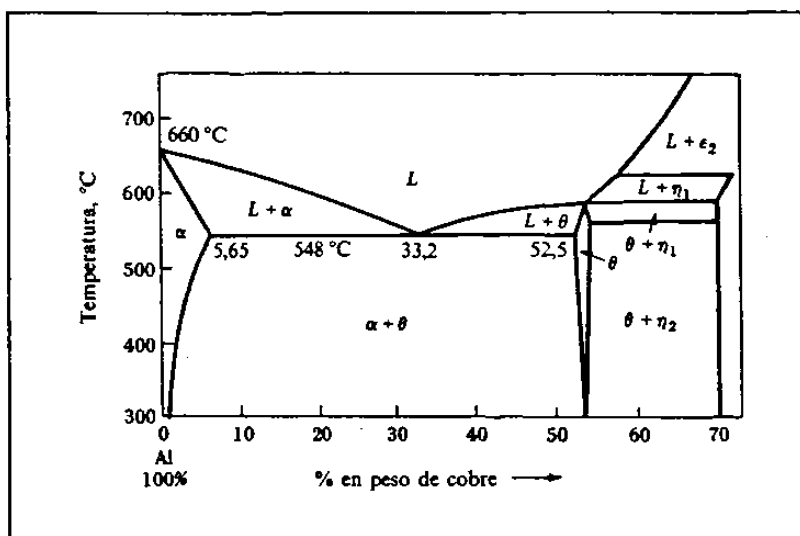


Fig. 3.1 Diagrama de fases Al-Cu (extremo rico en aluminio)

La mayoría de los sistemas binarios de aleación de aluminio exhiben muy poco endurecimiento por precipitación, y estas aleaciones se consideran no-tratables térmicamente.

Las aleaciones de aluminio endurecibles por precipitación incluyen:

- Aluminio-Cobre (CuAl_2)
- Aluminio-Cobre-Magnesio (el magnesio intensifica la precipitación)
- Aluminio-Magnesio-Silicio (Mg_2Si)
- Aluminio-Zinc-Magnesio (MgZn_2)
- Aluminio-Zinc-Magnesio-Cobre (se forman precipitados complejos)

El endurecimiento por precipitación, como se muestra en la Fig. 3.2 (Ref.1) es un proceso que se lleva a cabo en tres pasos:

- 1) Tratamiento de solubilización.- disolución de las fases solubles
- 2) Enfriamiento rápido.- crea una solución sólida sobresaturada
- 3) Tratamiento por precipitación o envejecido.- precipitación de los átomos del soluto.

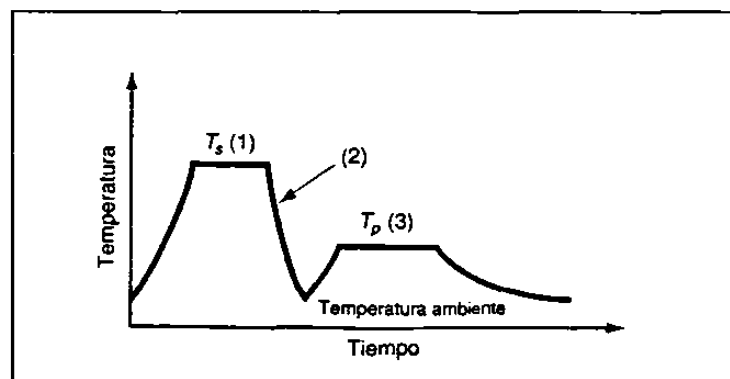


Fig. 3.2 Tratamiento térmico de precipitación 1) tratamiento de solución 2) enfriamiento rápido 3) precipitación

3.2.1.-Tratamiento térmico de solubilización.

Para obtener beneficio de la reacción de endurecimiento por precipitación es necesario producir una solución sólida. La aleación se calienta a una temperatura arriba de la solvus y se mantiene el tiempo requerido para obtener una solución sólida homogénea, la cual está en función de la microestructura antes del tratamiento.

Un sobrecalentamiento (arriba de la línea de liquidus) del material traería como consecuencia que las propiedades mecánicas como esfuerzo, ductilidad y tenacidad se degraden. Materiales que exhiben evidencia microestructural de sobrecalentamiento son generalmente categorizados como inaceptables por especificación.

La temperatura límite para el tratamiento de solución para las aleaciones Al-Mg-Si están en el rango de 515 a 540 ° C (960 a 1000°F) , el tiempo requerido varía dependiendo las dimensiones de la pieza.

Hay una condición conocida como HTO o alta temperatura de oxidación, la cual puede inducir al deterioro de las propiedades en las aleaciones de aluminio , se refiere a una difusión de hidrógeno que resulta por humedad en el horno y afecta la capa superficial durante las temperaturas elevadas del tratamiento , algunas veces agravada por el sulfuro cuando el horno de tratamiento térmico se usa también para aleaciones de magnesio. La humedad en contacto con el aluminio a altas temperaturas actúa como una fuente de hidrógeno el cual se difunde en el metal.

La manifestación más común de la alta temperatura de oxidación es una superficie ampollada, pero en ocasiones solamente discontinuidades internas o huecos, los cuales se detectan por inspección ultrasónica cuidadosa o por técnicas metalográficas. No todas las aleaciones son vulnerables a este tipo de ataque, la serie 7000 es la más susceptible seguida por la serie 2000 (Ref 5).

3.2.2.- Enfriamiento rápido.

El enfriamiento rápido es el paso más crítico en la secuencia de operación del tratamiento térmico, su objetivo es preservar la solución sólida formada en el tratamiento térmico de solución. Un enfriamiento rápido a baja temperatura, usualmente cercana a la temperatura ambiente, se aplica para retener los átomos del soluto en solución y mantener cierto número de sitios vacantes para promover la difusión. El rango de temperatura sobre la cual las aleaciones exhiben la máxima sensibilidad de enfriamiento es de 290 a 400 ° C. (Ref.13).

Los átomos del soluto que precipitan en la frontera de grano u otras partículas como las vacancias que emigran con mucha rapidez contribuyen al endurecimiento subsecuente. Para evitar este tipo de precipitación que es perjudicial a las propiedades mecánicas o a la resistencia a la corrosión, la solución sólida formada durante el tratamiento de térmico de solución debe ser enfriada rápidamente para producir una solución sólida sobresaturada (SSSS).

Frecuentemente las piezas delgadas son enfriadas por inmersión en agua caliente o por rocío a alta velocidad de agua caliente a una temperatura entre 80 y 90 °C. Aleaciones como la 6063 y 7005 son particularmente enfriadas en aire y sus propiedades mecánicas casi no se afectan por la baja velocidad de enfriamiento.

El esfuerzo más alto que se puede lograr y la mejor combinación de resistencia y dureza están asociadas con la velocidad más rápida de enfriamiento. La resistencia a la corrosión y el esfuerzo de corrosión son otras características que se mejoran .

Durante el enfriamiento rápido, ocurren cambios dimensionales produciendo esfuerzos internos, distorsión o alabeo particularmente en piezas delgadas o partes que contienen variación de espesores, por lo que se tiene que disminuir la velocidad de enfriamiento sacrificando un poco la resistencia.

3.2.3.- Tratamiento por precipitación o envejecido.

El requerimiento general para el endurecimiento por precipitación de una solución sólida sobresaturada emplea la formación de precipitados finos dispersos durante el tratamiento, este tercer paso se llama envejecido, y es donde se logra la resistencia y dureza de la aleación, cuando se realiza a temperatura ambiente se usa el término de envejecido natural, y a alta temperatura envejecido artificial.

En algunas aleaciones el endurecimiento por precipitación resulta de un envejecido natural, como en las designaciones del tipo T3 y T4 que se caracterizan por altos valores de esfuerzos de cedencia y último de tensión y resistencia a la fractura y fatiga, para estas aleaciones la sobresaturación de átomos y vacancias retenidas por el enfriamiento causa la formación rápida de las zonas GP incrementando el esfuerzo, obteniendo su valor máximo en 4 o 5 días. El fenómeno fue observado por primera vez por el metalurgista alemán, Alfred Wilm en 1906 (Ref 14), quien notó que una aleación de aluminio que contuviese pequeñas cantidades de magnesio, silicio y cobre, al enfriarla rápidamente de una temperatura en la región de 500 °C, endurecía subsecuentemente sin someterla a otro proceso, si se le permitía permanecer a la temperatura ambiente durante varios días.

Hay aleaciones que requieren un envejecido artificial, designaciones del tipo T5 a T10, se logra a temperaturas en el rango de 115° a 190 °C, y tiempos que varían de 5 a 48 horas, la combinación de tiempo y temperatura es crítica para lograr las propiedades deseadas en la aleación. El efecto se ilustra en la Fig. 3.3 (Ref. 1), a temperaturas elevadas como en el caso (a), la dureza se eleva en un tiempo relativamente corto, mientras que a bajas temperaturas como en (b), se requiere más tiempo pero se obtiene mayor dureza. La continuación del proceso como se observa en la gráfica da como resultado una reducción en las propiedades de dureza y resistencia, a esta reducción se le da el nombre de sobre-envejecido.

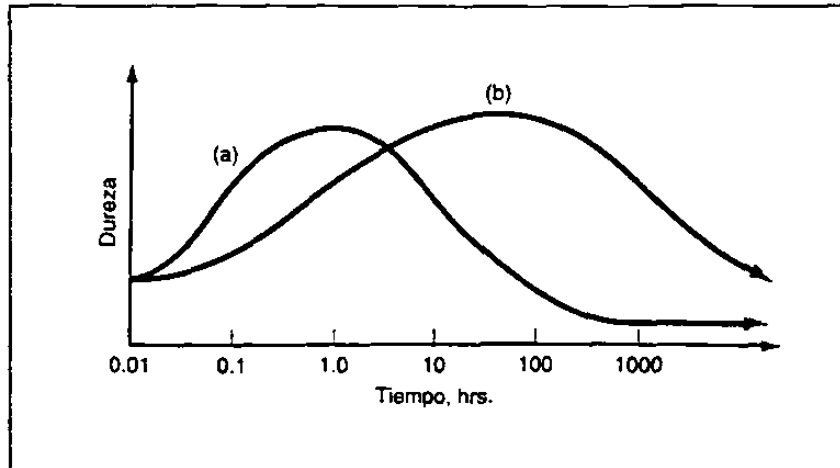


Fig. 3.3 Efecto de la temperatura y el tiempo durante el tratamiento de precipitación a) temperatura alta b) temperatura baja

Las propiedades mecánicas y otras características cambian continuamente en función del tiempo y la temperatura durante el envejecido, como se muestra en la Fig. 3.4 (Ref. 5).

3.3.- Mecanismos de endurecimiento.

No ha sido posible establecer en forma definitiva la manera en que las partículas de precipitado hacen más resistente a la matriz en el endurecimiento por precipitación, pero en general se puede decir que la resistencia de una aleación envejecida aumenta con la dificultad de mover las dislocaciones. Una dislocación debe cortar las partículas de precipitado en su trayectoria o moverse entre ellas Fig. 3.5 (Ref. 6), en cualquier caso puede demostrarse que se necesita aumentar el esfuerzo para que se desplacen las dislocaciones.

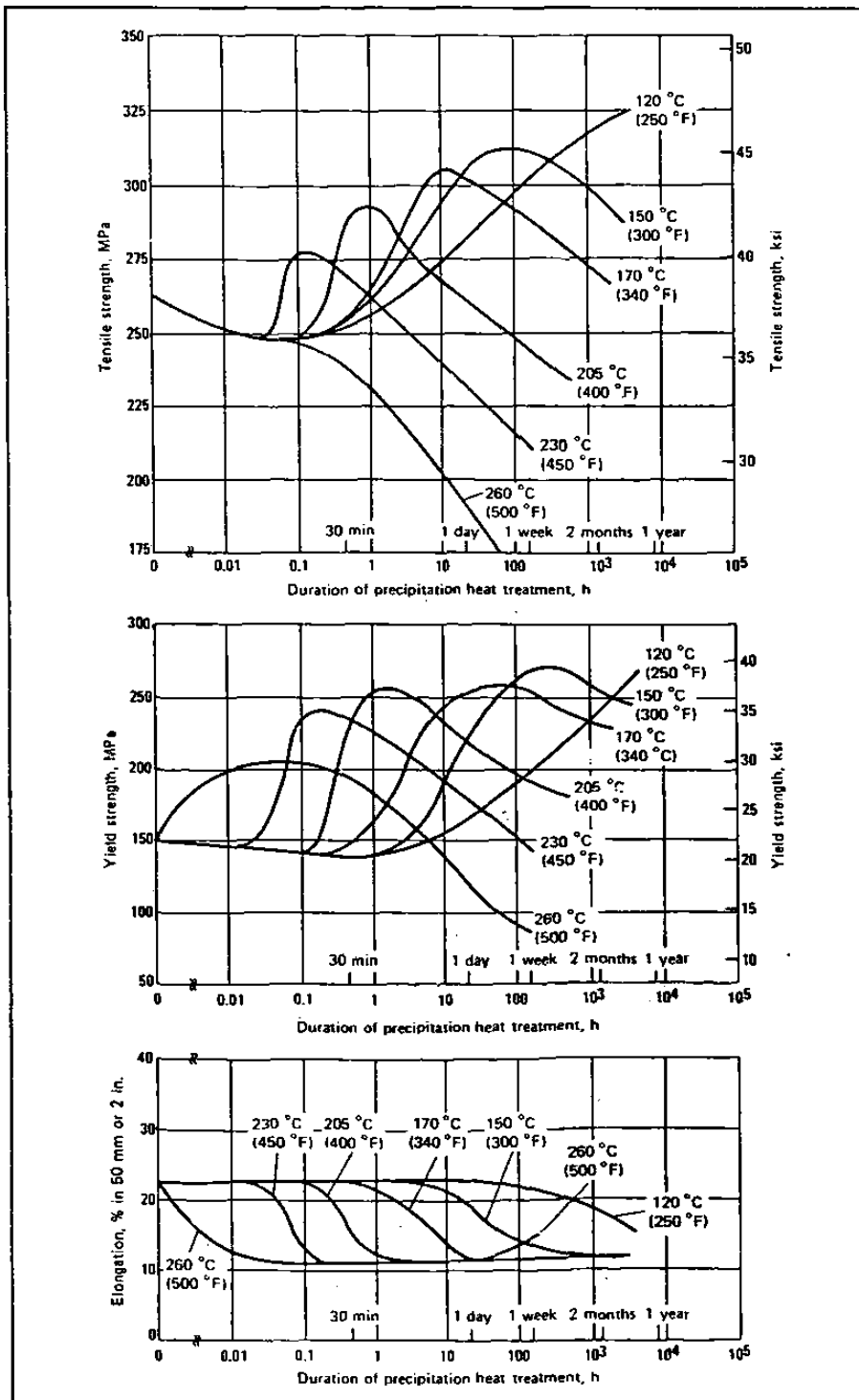


Fig. 3.4 Características del envejecido en una aleación 6061 en función del tiempo y la temperatura

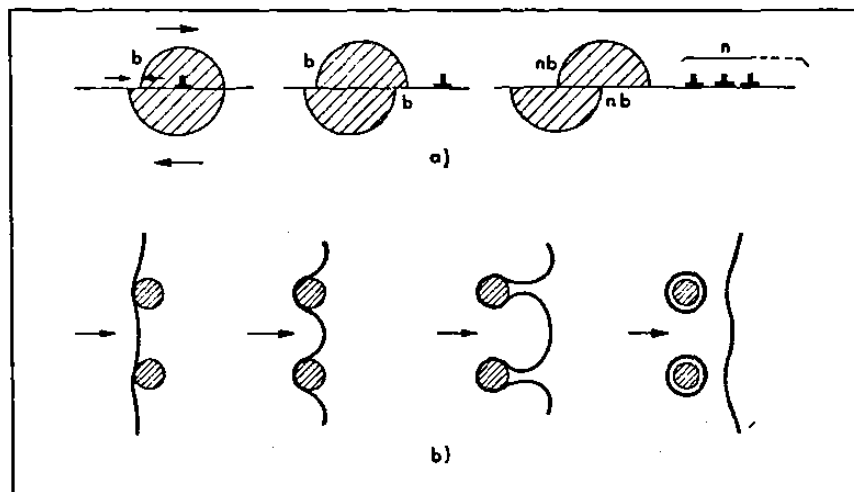


Fig. 3.5 a) Corte de un precipitado b) rodeo de precipitados

Los precipitados no pueden ser atravesados por las dislocaciones si no existe continuidad del plano de deslizamiento, además si el precipitado es duro rechaza las dislocaciones, resulta por lo tanto más fácil rodearla que cortarla la Fig. 3.5 b) representa las fases sucesivas del fenómeno, esto constituye el mecanismo de Orowan..

3.3.1.- Endurecimiento en aleaciones no tratables térmicamente.

Las aleaciones de aluminio trabajadas de las series 3000 y 5000 que contienen magnesio, manganeso y/o cromo, la serie 1000, algunas aleaciones de la serie 4000 que contienen sólo silicio, y vaciadas de las series 400.0 y 500.0 que contienen silicio o magnesio y la serie 100.0 son no-tratables térmicamente.

El endurecimiento en este tipo de aleaciones se hace por solución sólida, constituyentes de segunda fase, refinamiento de grano con precipitados dispersos y por deformación, como rolado en frío o estirado.

3.3.2 .- Aleaciones tratables térmicamente.

Las series 2000 (Al-Cu, Al-Cu-Mg), 6000 (Al-Mg-Si) y 7000 (Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu) son aleaciones de aluminio trabajadas que responden al endurecimiento por tratamiento térmico, se pueden clasificar en dos grupos: las que tienen esfuerzo medio y son soldables (Al-Mg-Si y Al-Zn-Mg), y las de alto esfuerzo utilizadas en la construcción de aviones, muchas de las cuales tienen soldabilidad limitada (Al-Cu, Al-Cu-Mg y Al-Zn-Mg-Cu) y las de la serie 4000 que contienen Mg.

3.4 .- Secuencia de precipitación en aleaciones de aluminio de la serie 6000

En la trayectoria del endurecimiento por precipitación de las aleaciones de aluminio de la serie 6000, Martin (Ref. 10) y Jaramillo (Ref. 11) identifican cuatro estructuras secuenciales: (1) solución sólida sobresaturada α , (2) zonas GP, (3) fase β' y (4) fase β (Mg_2Si).

Las zonas de precipitación GP se forman a bajas temperaturas de envejecimiento, tienen forma de aguja y son detectadas al microscopio electrónico, de transmisión, la fase β' es coherente, esto quiere decir que la partícula precipitada tiene la misma estructura que la matriz, la fase β de

equilibrio es estable e incoherente con la matriz y tiene la composición química (Mg_2Si).

3.5 .- Aleaciones Al-Mg-Si serie 6000.

Las aleaciones de la serie 6000 contienen silicio y magnesio en las proporciones requeridas para la formación de siliciuro de magnesio (Mg_2Si), el cual a su vez forma un sistema eutéctico simple con el aluminio. Estas aleaciones tienen buena formabilidad, soldabilidad, buen maquinado, resistencia a la corrosión con un esfuerzo medio. Sus usos incluyen aplicaciones arquitectónicas, equipo de transportación y estructuras soldadas, se usa en secciones extruidas y se dividen en tres grupos:

El primer grupo comprende las aleaciones con agregados de magnesio y silicio en porcentajes entre 0.8 y 1.2 %, su enfriamiento normalmente se efectúa en agua, secciones delgadas menores de 3 mm, pueden enfriarse en aire, se obtiene un esfuerzo moderado con envejecido a una temperatura entre 160 a 190°C, la aleación 6063 es tal vez la mas utilizada de todas las aleaciones Al-Mg-Si en la designación T6.

Los otros dos grupos contienen magnesio y silicio en porcentajes arriba de 1.4 %, las aleaciones en uno de los grupos se usan generalmente como materiales estructurales, el ejemplo mas común es la 6061. Las aleaciones en el otro grupo contienen silicio en exceso para formar Mg_2Si , el cual promueve una respuesta adicional en el envejecido en dos formas, refinando el tamaño de las partículas (Mg_2Si) y precipitando silicio.

La región rica en aluminio del diagrama de equilibrio correspondiente a este sistema es la representada en la Fig. 3.6 (Ref.13)

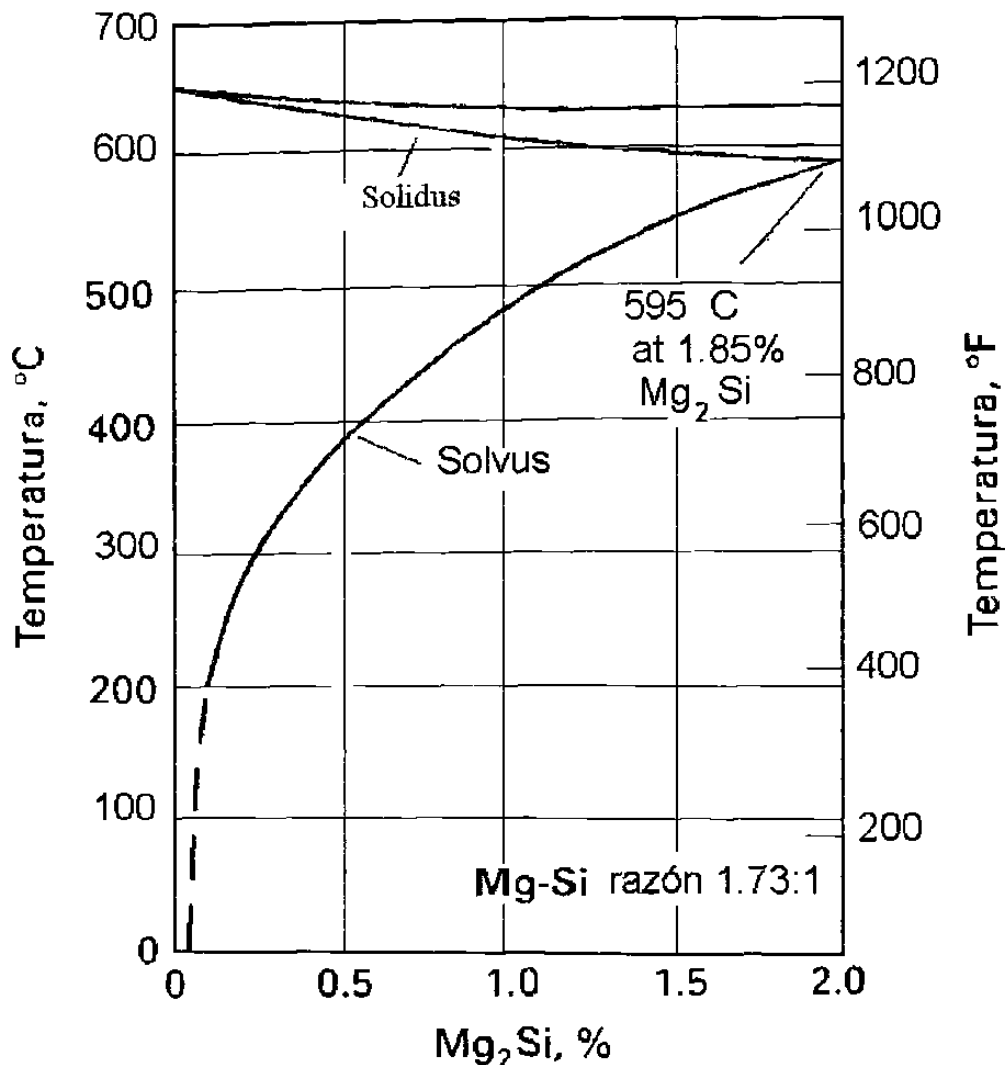


Fig. 3.6 Diagrama de equilibrio aluminio-siliciuro de magnesio

Estas aleaciones alcanzan su máxima resistencia cuando se les somete a un proceso de envejecimiento artificial, designación T6, que da lugar a la precipitación del Mg_2Si .

3.6 Propiedades de la aleación 6063 (0.7 Mg-0.4 Si).

Los valores de la composición química de la aleación 6063 (% en peso), son: Si 0.20-0.60, Fe 0.35, Cu 0.10, Mg 0.45-0.90, Cr 0.10, Zn 0.10, Ti 0.10, Mn 0.10, otros 0.05 de cada uno, corresponden a porcentajes máximos, excepto en los que se indica rango.

Las propiedades típicas de la aleación en la designación T6 son: (Ref. 15)

Esfuerzo de tensión	241 Mpa
Esfuerzo de cedencia	214 Mpa
% de elongación	12
Dureza brinell	73
Esfuerzo de corte	152 Mpa
Esfuerzo de fatiga	69 Mpa
Razón de Poisson	0.33
Módulo elástico	68.3 Mpa a tensión 25.8 Mpa a corte 69.7 Mpa a compresión
Densidad	2.69 gr./cm ³
Temperatura liquidus	655 °C
Temperatura solidus	615 °C
Conductividad térmica	201 w/m.k
Resistividad eléctrica	33 n Ω.m

CAPITULO 4

ENSAYO DE COMPRESIÓN AXIAL

4.1 .- Introducción.

Las cargas de compresión se aplican a muchas estructuras de ingeniería, en el formado de metales son mucho más comunes que las de estirado, procesos importantes en la industria comprenden el laminado, forjado y extrusión.

En el ensayo de compresión una probeta preparada se somete a una carga gradualmente creciente en sus extremos, la cual produce una acción aplastante, hasta que ocurre la falla, es de los ensayos mecánicos el más simple. No está limitado a la determinación de las propiedades de un material en forma estandarizada se puede utilizar en materiales manufacturados, piezas fabricadas y miembros estructurales

4.2.- Requisito para ser un elemento a compresión

Existen dos tipos de elementos sometidos a carga de compresión, elementos cortos (falla por compresión o aplastamiento) y elementos largos (columnas falla por pandeo).

Es necesario que la probeta trabaje a compresión y no a la acción de miembros estructurales como columnas, a medida que la longitud se aumenta se presenta una tendencia hacia la flexión de la pieza, con la consiguiente distribución no-uniforme de esfuerzo.

La relación entre la longitud y sección de una probeta, se conoce como relación de esbeltez y está dada por el cociente entre la longitud inicial y el radio de giro (Ref. 9).

$$\text{Relación de esbeltez} = L_0/\rho$$

donde:

L_0 = longitud inicial

ρ = radio de giro

El radio de giro es la raíz cuadrada del momento de inercia de la sección respecto al área transversal de la probeta.

$$\rho = (I/A)^{1/2}$$

donde:

ρ = radio de giro

I = momento de inercia menor de la sección

A = área de la sección transversal

Cuando la relación de esbeltez es menor que 40 se considera un elemento corto, si es mayor de 60, columna larga y con un valor entre 40 y 60, columna intermedia.

4.3 .- Forma de las probetas.

Para que el esfuerzo sea uniforme en la probeta de compresión, una sección circular es preferible a otras formas, sin embargo la sección cuadrada o rectangular se usa frecuentemente para piezas manufacturadas, por ejemplo el azulejo y el ladrillo.

4.3.1 .- Probetas de forma cilíndrica.

Se recomienda que las probetas estandarizadas sean de forma cilíndrica circular sólida, tres formas de probeta son recomendadas por la ASTM E-9, designadas como corta para usarse en placas, mediana para uso general y larga para ensayos que determinen el módulo de elasticidad Fig. 4.1 (Ref. 5), se sugiere una relación entre longitud y diámetro (L/D) de 10 como un límite superior práctico.

La probeta no debe variar en diámetro, más de 0.05 mm, los extremos deben ser planos para no causar concentraciones de esfuerzos y perpendiculares al eje de la pieza para no causar flexión debida a la carga concéntrica.

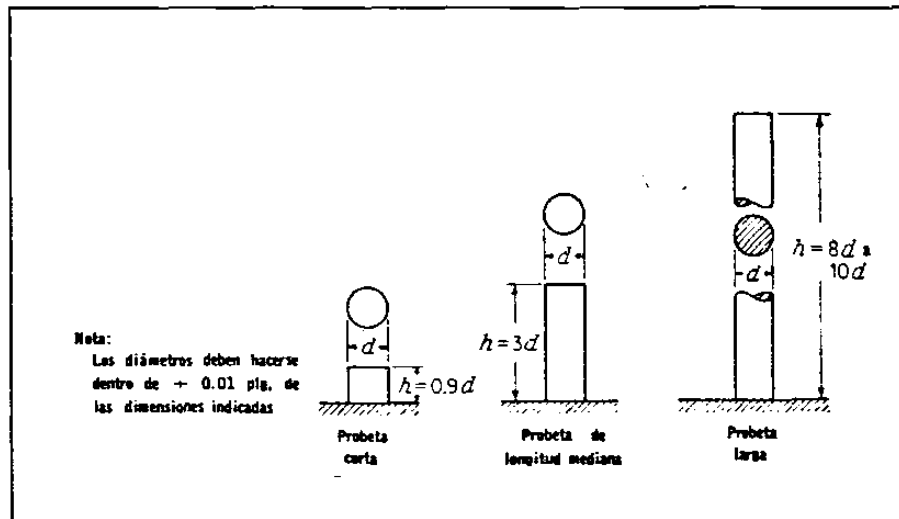


Fig. 4.1 Probetas para ensayos de compresión en materiales metálicos ASTM E-9

4.3.2 .- Probetas rectangulares.

Probetas de forma rectangular se pueden utilizar, con un largo y ancho que dependen de la junta usada para soportar la muestra. El largo debe ser el suficiente para acortar la probeta la cantidad requerida para definir el punto o esfuerzo de cedencia, pero no tan largo que permita bucleo.

4.4 .- Precauciones al hacer el ensayo.

Las dimensiones deben determinarse con precisión, el largo y el diámetro de la probeta se miden con un micrómetro o vernier, en las probetas cilíndricas, deben hacerse cuando menos dos mediciones de diámetros perpendicularmente. Los extremos de la probeta y las caras de los bloques de

apoyo deben limpiarse con acetona o cualquier otro solvente adecuado para quitar la grasa y el aceite que pudiera influir en la restricción friccional de las superficies. Debe tenerse mucho cuidado para lograr el centrado y la alineación de la probeta y los bloques de apoyo en la máquina de ensaye.

La velocidad del ensayo no debe ser mayor que aquella a la cual las lecturas de carga y deformación puedan tomarse con el grado de exactitud deseado, estos valores servirán para obtener la gráfica esfuerzo-deformación.

4.5 .- Gráfica esfuerzo-deformación.

La gráfica de esfuerzo contra deformación es la relación que describe las propiedades mecánicas de los materiales. Hay dos tipos, la ingenieril (e,S) y la real (ϵ,σ), esta última es mucho más significativa en los estudios relacionados con las operaciones de formado.

4.5.1.- Gráfica ingenieril.

El esfuerzo y deformación ingenieriles en un ensayo de compresión se definen con respecto a la longitud y área originales del espécimen. El esfuerzo se obtiene:

$$S = P/A_0$$

donde:

S = esfuerzo ingenieril (Mpa, Ksi.)

P = carga (N, Lb.)

A_0 = área inicial (mm^2 , pulg.^2)

La deformación ingenieril se define como:

$$e = \delta/L_0$$

donde:

e = deformación ingenieril (mm/mm, pulg/pulg)

δ = deformación total (mm, pulg.)

L_0 = longitud inicial (mm, pulg.)

4.5.2.- Gráfica real.

El esfuerzo real en cualquier momento dado durante la prueba, es menor que el esfuerzo de ingeniería, ya que el área instantánea sobre la cual la carga está distribuida, es más grande que el área inicial. El valor de esfuerzo que se obtiene al dividir la carga aplicada entre el valor instantáneo del área, se define como esfuerzo real (σ).

$$\sigma = F/A$$

donde:

σ = esfuerzo real (Mpa, Ksi)

F = fuerza (N, Lb)

A = área real instantánea que resiste la carga (mm^2 , pulg^2)

la deformación real se define como :

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L dL/L = \ln (L/L_0)$$

donde:

L = longitud instantánea

L₀ = longitud inicial

La curva esfuerzo-deformación tiene dos regiones, que indican formas distintas de comportamiento uno elástico y otro plástico. La diferencia entre las curvas real e ingenieril se dá en la región plástica, la Fig. 4.2 (Ref.8) muestra curvas ingenieriles características para materiales dúctiles y no dúctiles en compresión, la línea punteada es la curva real, en compresión es más baja debido al aumento de sección en la probeta.

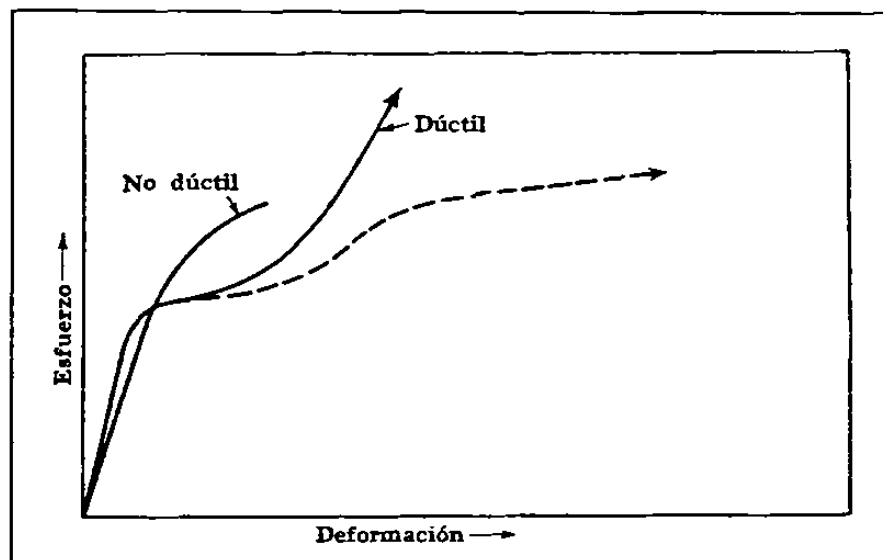


Fig. 4.2 Relaciones entre esfuerzo y deformación en muestras sometidas a compresión

El esfuerzo y deformación real se relacionan con las ingenieriles mediante las expresiones:

$$\sigma = S (1 - e)$$

$$\varepsilon = \ln (1 - e)$$

4.6 .- Limitaciones al hacer el ensayo.

Los datos de esfuerzo y deformación calculados pueden ser erróneos cuando en la probeta sometida a compresión suceden los siguientes fenómenos:

- pandeo o buceo (*buckling*)
- abarrilamiento (*barreling*)

Los riesgos del buceo se pueden reducir si se tiene cuidado en el alineamiento de la probeta para aplicar la carga axial.

Cuando una probeta cilíndrica es comprimida, la expansión de Poisson ocurre, si es restringida por la fricción entre los extremos de la probeta y los dados de la máquina, dá como resultado la característica de abarrilamiento como se muestra en la Fig. 4.3 (Ref. 1), a causa de esta fricción se generan esfuerzos tridimensionales difíciles de analizar.

4.7 .- Propiedades que se obtienen.

En un ensayo comercial, una propiedad que generalmente se determina es la resistencia máxima a la compresión, que es el esfuerzo máximo que el

material es capaz de desarrollar, un material quebradizo posee un valor definido, en el caso de materiales dúctiles, el valor que se obtiene es arbitrario, dependiendo del grado de deformación que se requiera.

Propiedades como el esfuerzo de cedencia, módulo de elasticidad y resiliencia se pueden obtener para cualquier material en un ensayo de compresión.

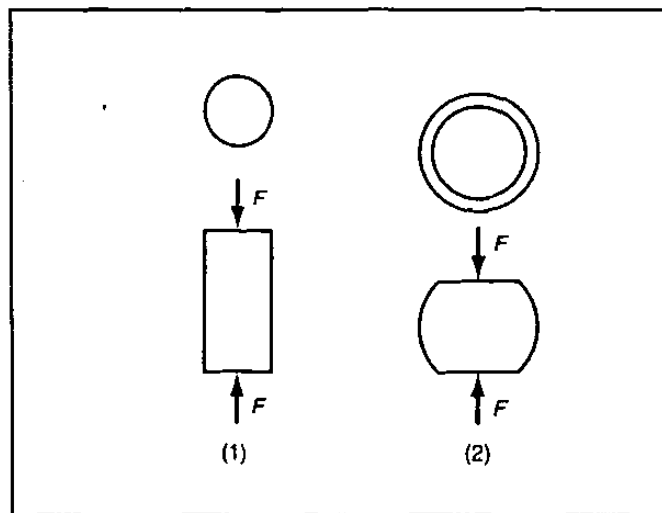


Fig. 4.3 Efecto de abarrilamiento en un ensayo de compresión
 1) inicio del ensayo 2) después de la compresión

4.8 .- Reducción de la fricción.

El uso de un lubricante entre la probeta y la maquina reduce la fricción, un material de uso muy común es el teflon en cinta de 0.1 mm de

espesor, también puede utilizarse de flurocarbono o bisulfuro de molibdeno, la acción del lubricante puede mejorar si las caras de la probeta son pulidas.

4.9 .- Fractura en compresión.

Las probetas de todos los materiales se fracturan cuando se comprimen, la grieta generalmente se inicia en la superficie exterior.

En algunos materiales ocurre en la superficie el efecto cáscara de naranja antes de la falla, en particular en algunas aleaciones de aluminio, un ejemplo es ilustrado en la Fig. 4.4 (Ref. 9) para una aleación 7075-T6.

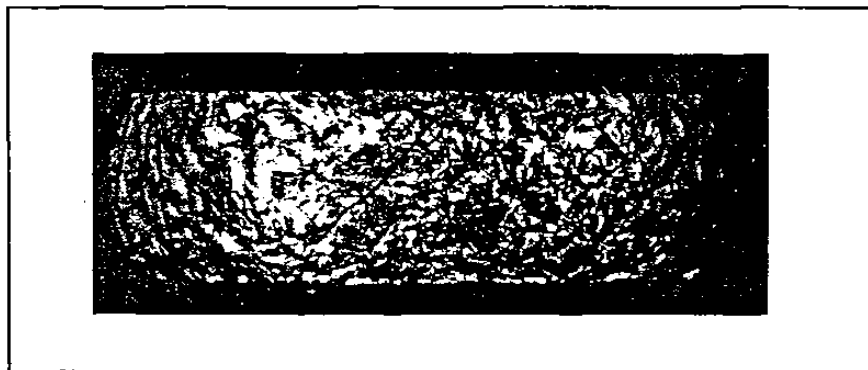


Fig. 4.4 Vista de una aleación de aluminio 7075-T₆ comprimida un 72 % mostrando el efecto piel de naranja y agrietamiento

Hay casos en los que se presentan macrogrietas como se muestra en la Fig. 4.5 (Ref. 9), corresponde a un acero AISI-SAE 4340, revenido a 240 °C con una dureza de 52 HRC, apareció una grieta cuando la deformación

alcanzó 30 % y otras mas aparecieron al término del ensayo con 72 % de deformación.

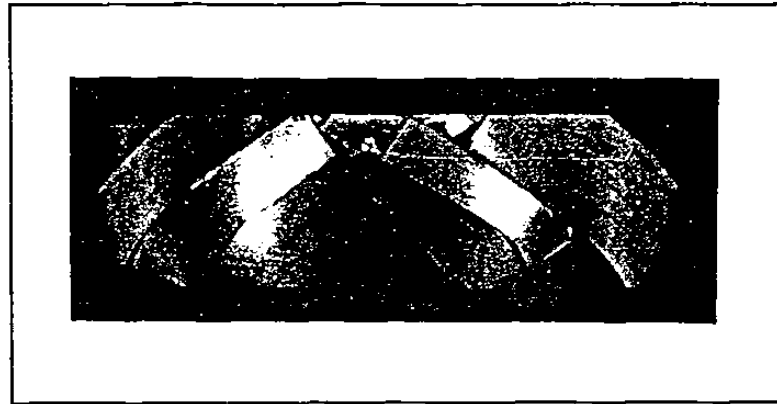


Fig. 4.5 Macro grietas en una probeta de acero AISI-SAE 4340 comprimida un 42 %

4.10.- Coeficiente de ovalidad (Ov).

El coeficiente de ovalidad (Ov) se define como la razón de los diámetros máximo y mínimo de la pieza deformada.

$$Ov = d_{fmax} / d_{fmin}$$

La ovalidad puede ocurrir por causa de los efectos de textura y microestructura en la deformación (Ref. 12)

4.11.- Coeficiente de altura (H).

El coeficiente de altura (H) es la razón de la desviación estándar de cuatro medidas de altura de la pieza deformada medidas en el centro y a intervalos de 120° en la orilla, dividida entre el promedio de las mismas.

$$H = Sh_f / h_f$$

donde:

Sh_f = desviación estandar de las cuatro medidas de altura

h_f = promedio de las alturas

Si H es igual o mayor que 0.04 la prueba es inválida , H dá una indicación del paralelismo de deformación en la pieza.(Ref. 12).

CAPITULO 5

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

5.1.- Introducción.

El material utilizado fué una barra de aleación de aluminio 6063 extruida, es de las más usadas de la serie 6000 en la cual el silicio y el magnesio son los elementos principales de aleación.

5.2.- Caracterización de la aleación.

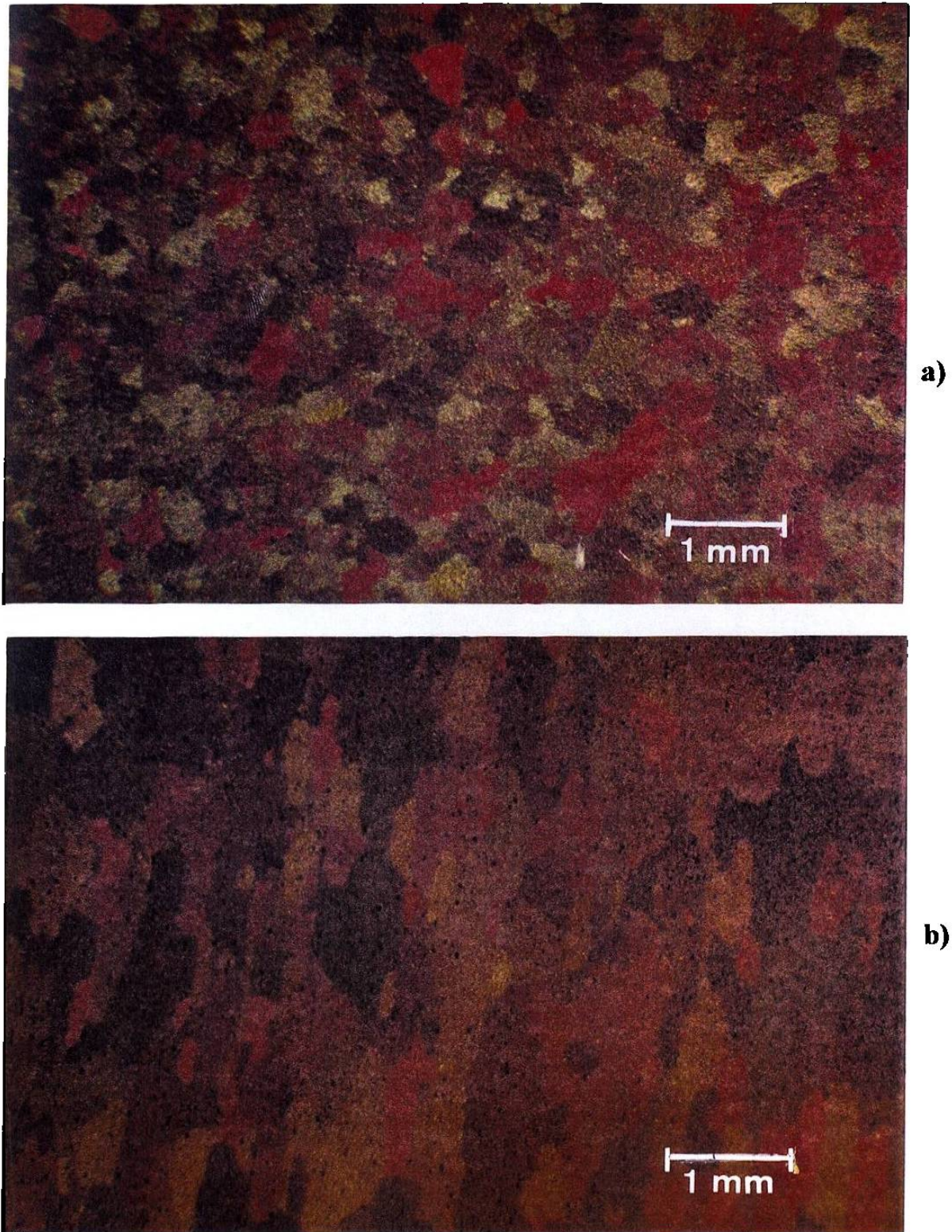
La aleación fue analizada químicamente para obtener su composición, y examinada al microscopio para determinar su microestructura.

5.2.1.- Composición química.

El análisis químico reveló que los elementos de la aleación estaban presentes con los siguientes porcentajes en peso: 0.50 % Si., 0.21 % Fe, 0.022 % Cu, 0.01 % Mn, 0.52 % Mg, 0.008 % Cr, 0.018 % Zn, 0.009 % Ti, Al. balance.

5.2.2.- Microestructura.

Para realizar el ensayo metalográfico en el cual sólo se determinó la forma y tamaño de grano, se prepararon dos muestras en dirección transversal y longitudinal al extruido, una vez que sus superficies fueron pulidas y atacadas en condiciones precisas se procedió a observarlas en el microscopio electrónico, las microestructuras que se obtuvieron son las que se muestran en la Fig. 5.1, en a) el análisis es en la dirección transversal al extruido, donde se observan granos de forma equiaxial los cuales corresponden a un aluminio, en b) dirección longitudinal al extruido los granos tienen forma alargada como resultado del proceso de compresión en el material cuando es forzado a fluir a través del orificio del dado de extrusión.



**Fig. 5.1 Microestructura de una aleación de aluminio 6063
Dirección del extruido a) transversal b) longitudinal**

5.3.- Preparación de la muestra.

A partir de una barra de 47.5 mm de diámetro, se maquinaron 24 muestras cilíndricas de 9.5 mm de diámetro y 14.2 mm de altura, en el sentido longitudinal al extruido Fig. 5.2.

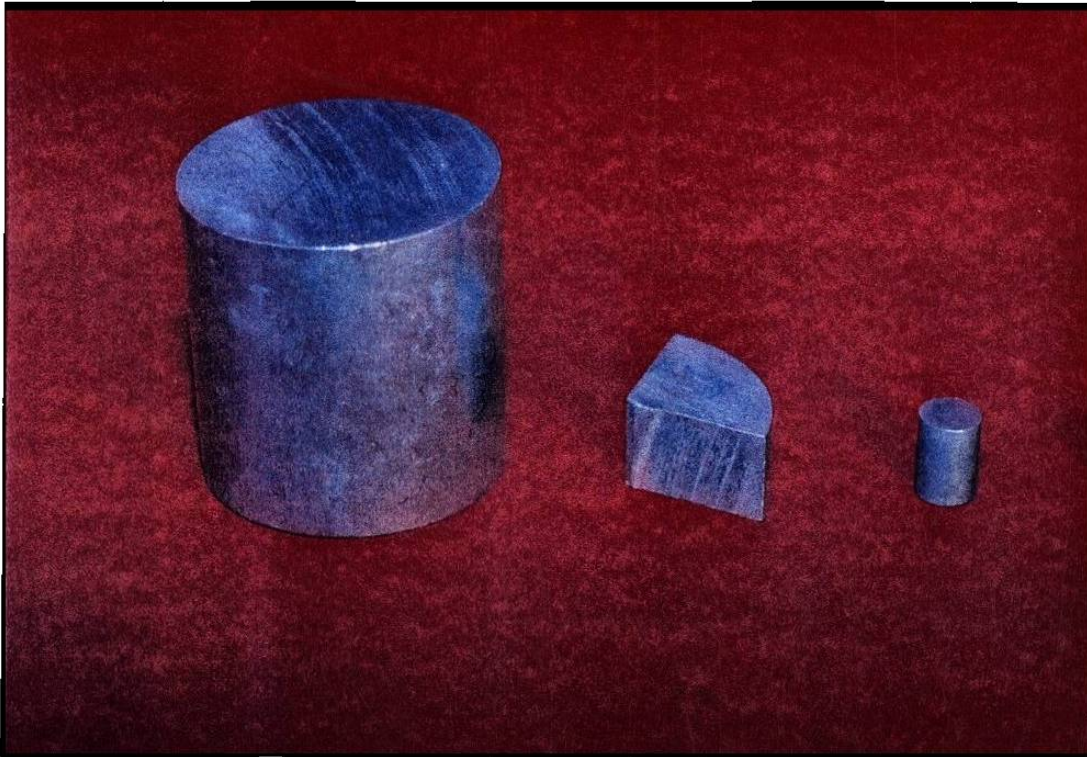


Fig. 5.2 Secuencia de los pasos para obtener la muestra a partir de la barra.

5.4.- Tratamiento térmico.

Se sometieron 18 muestras a tratamiento de solubilización y enfriamiento rápido, posteriormente 6 de las muestras fueron envejecidas

artificialmente y 6 sobreenvejecidas. De esta forma se obtuvieron muestras en condiciones de solución sólida sobresaturada, máxima dureza y sobreenvejecido.

5.4.1.- Tratamiento de solubilización.

Se introdujeron 18 muestras en el horno a una temperatura de 520°C , manteniéndolas durante 4.20 horas Fig. 5.3.

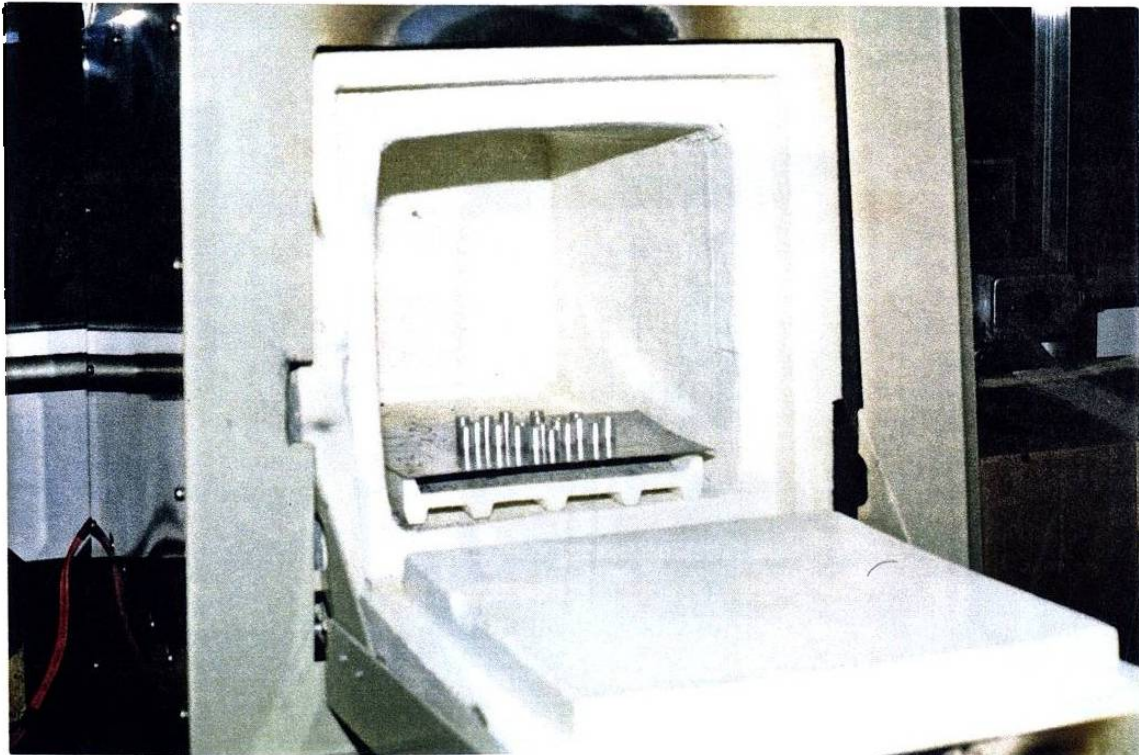


Fig. 5.3 Muestras en el momento de terminar el tratamiento de solubilización

5.4.2.- Enfriamiento rápido.

Después del tratamiento de solubilización las 18 muestras fueron enfriadas rápidamente en agua a temperatura ambiente.

5.4.3.- Tratamiento de envejecido.

A 6 de las muestras completamente sobresaturadas se les sometió a un tratamiento de envejecido artificial a 180°C por un tiempo de 5.30 horas, Fig. 5.4.

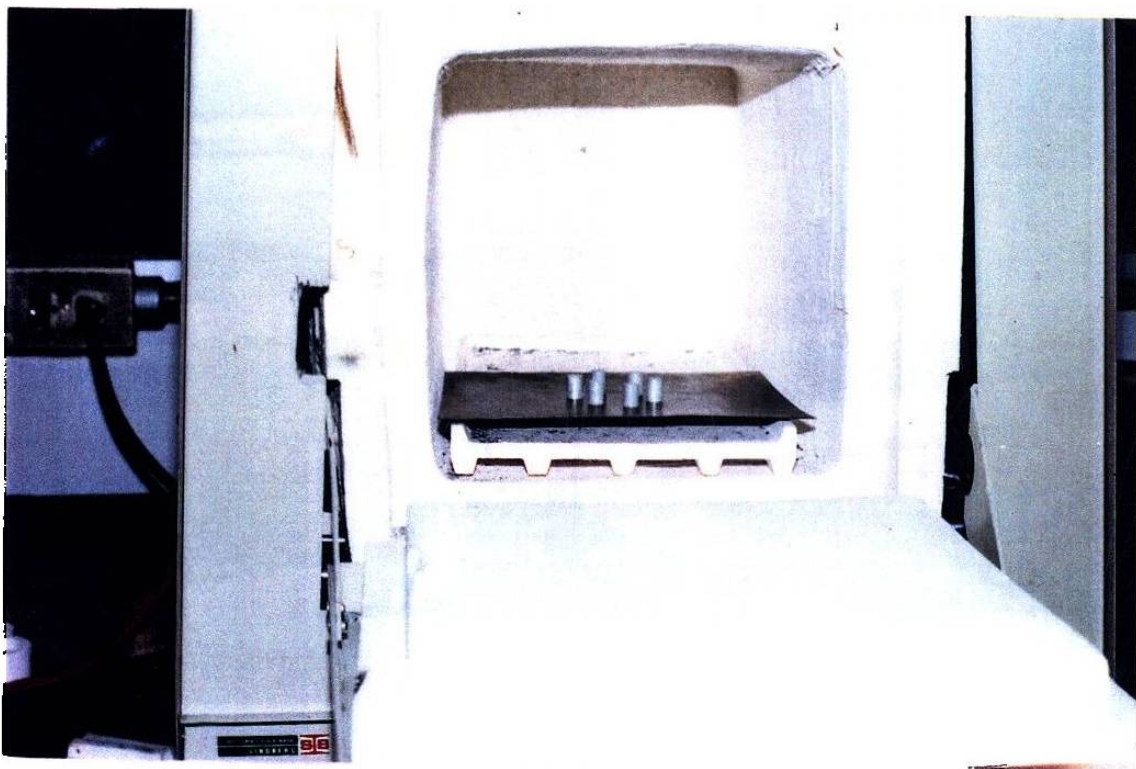


Fig. 5.4 Muestras que recibieron tratamiento de envejecido artificial.

5.4.4.- Tratamiento de sobrevejecido.

A 6 muestras sobresaturadas se les hizo un tratamiento de sobrevejecido a una temperatura de 230 °C durante 40 horas, las temperaturas registradas por un termopar fueron capturadas por un programa de computación Fig. 5.5.

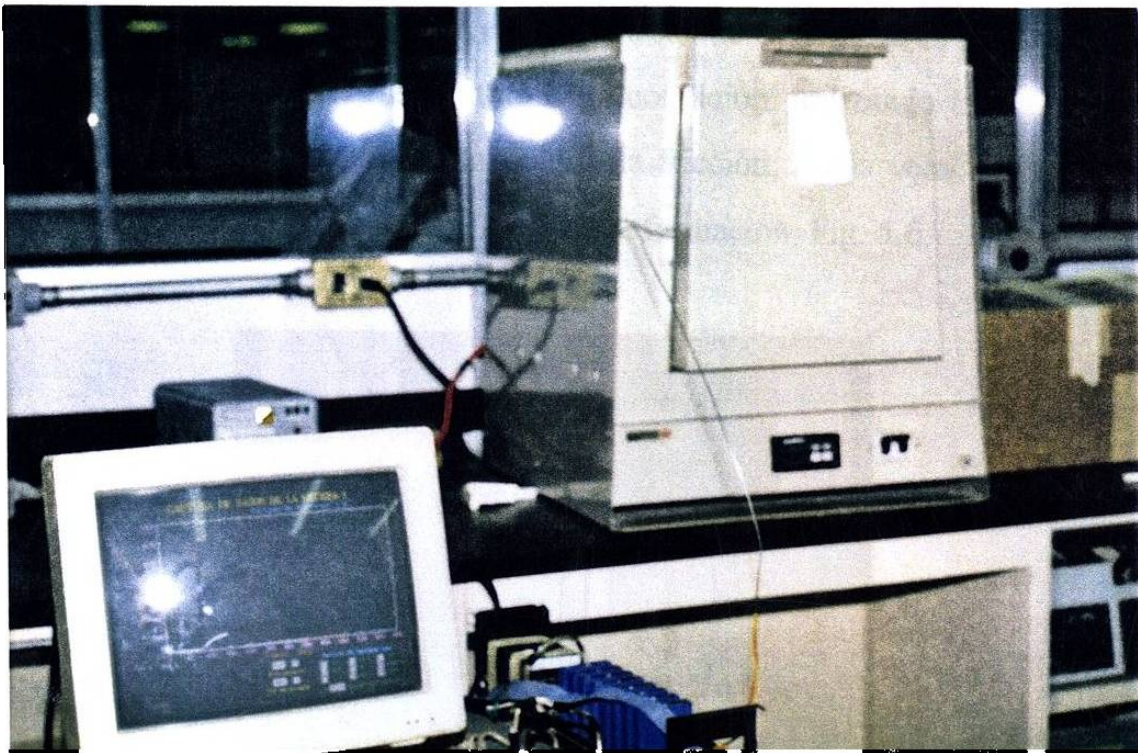


Fig. 5.5 Muestras dentro del horno sometidas a tratamiento de sobrevejecido.

5.5.- Microdureza.

Se realizó un ensayo de microdureza Vickers a una muestra de cada condición, extruída, máxima dureza, sobreenviejecida y sobresaturada , en cada una se hicieron 4 identaciones se determino el promedio y la desviacion estandar.

5.6.- Ensayos de compresión.

En una máquina universal Instron se realizaron ensayos de compresión en 4 muestras, una de cada condición, utilizando teflón entre la muestra y los aditamentos para reducir la fricción, a una velocidad de 0.84 mm/min (10^{-3} seg⁻¹) hasta un 70 % de deformación Fig. 5.6.

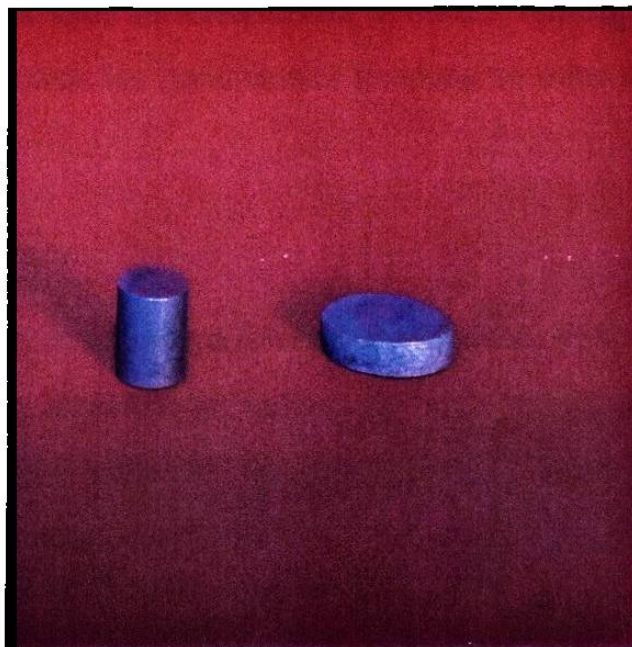


Fig. 5.6 Muestra antes de comprimirla comparada con una deformada un 70 %

CAPITULO 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Introducción.

En los ensayos de compresión y dureza realizados en las muestras después de efectuar los tratamientos térmicos se obtuvieron los siguientes resultados.

6.2.- Microdureza.

La dureza sirve para monitorear el efecto del tratamiento térmico en la resistencia de la aleación, los valores de microdureza que se obtuvieron en los cuatro ensayos realizados en cada probeta, el promedio y la desviación estándar se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 Microdurezas Vickers para condiciones de sobresaturado, máxima dureza, sobreenvejecido y extruido

condición de la muestra	microdureza vickers	x	σ_x
extruida	74.98 75.25 75.66 74.58	75.11	± 0.2066
sobreenvejecida	54.44 55.29 55.98 55.49	55.3	± 0.4127
máxima dureza	95.18 92.72 93.54 92.72	94.79	± 3.42
sobresaturada	49.76 49.40 48.69 47.51	48.84	± 0.9838

La probeta en la condición de extruida (condición original) tiene un tratamiento térmico tipo T6, es decir tratado en solución y envejecido, su valor de dureza es de 75.11. La probeta sometida a tratamiento térmico de solubilización a una temperatura de 520 ° C durante 4 horas 20 minutos y

enfriada en agua , después del enfriamiento la estructura de la muestra es una solución sólida sobresaturada con el valor más bajo de dureza 48.84, esto es porque los precipitados están disueltos. El valor de dureza más alto se obtuvo en la probeta en la condición de máxima dureza, la cual después de la solubilización y enfriamiento rápido se le dió un envejecido artificial a 180° C durante 5 horas 30 minutos, con lo cual se logró un precipitado fino disperso, estas partículas restringen el movimiento de las dislocaciones, por lo tanto se produce un aumento de resistencia en el material y en consecuencia un aumento en la dureza. La probeta sometida a tratamiento de sobre-envejecido a 230 ° C durante 40 horas tiene una dureza de 55.3, esto se debe a que el proceso de precipitación es demasiado largo y los precipitados tienen la oportunidad de coalescer, dejando espacios libres por los cuales las dislocaciones pueden pasar originando una disminución de la dureza (Ref. 13).

6.3.- Ensayos de compresión.

Con los valores de carga y deformación registrados en los ensayos de compresión se obtuvieron las gráficas de esfuerzo-deformación reales e ingenieriles de cada una de las muestras. Utilizando el método offset con criterio de deformación del 2 % se determinó el esfuerzo de cedencia σ_{yp} con los siguientes resultados:

Condición	σ_{yp}
Máxima dureza	244 Mpa

Extruida	180 Mpa
Sobreenvejecida	156 Mpa
Sobresaturada	76 Mpa

6.3.1.- Gráficas esfuerzo-deformación ingenieriles.

Los valores de esfuerzo y deformación ingenieriles se calculan a partir del área y longitud inicial de la probeta, con ellos se obtiene la gráfica que se muestra en la Fig. 6.1 y corresponde a la probeta en la condición de máxima dureza, las gráficas para las condiciones de extruido, sobresaturado y sobreenvejecido se muestran en las Figs. A₁, A₃ y A₅ del apéndice A. Una comparación de las gráficas ingenieriles para las cuatro condiciones se muestra en la Fig. 6.3.

En la región elástica de la gráfica la relación entre el esfuerzo y la deformación es lineal hasta alcanzar el punto de fluencia, que puede identificarse en la gráfica por el cambio en la pendiente al final de la línea recta y es donde inicia la deformación plástica del material. En la región plástica la muestra continúa cilíndrica hasta un cierto punto, en toda esta zona las fórmulas del esfuerzo y la deformación son válidas, después la muestra sufre un abarrilamiento debido a la fricción entre ella y los aditamentos iniciando una inestabilidad plástica donde las fórmulas ya no son válidas. Este punto se manifiesta con un cambio en la pendiente en la curva aproximadamente en el punto A de la gráfica.

6.3.2.- Gráficas esfuerzo-deformación reales.

El esfuerzo y deformación reales se definen con respecto a la longitud y áreas instantáneas de la probeta, estos valores son más significativos en los estudios relacionados con las operaciones de formado, la Fig. 6.2 muestra la gráfica esfuerzo.-deformación real correspondiente a la probeta en la condición de máxima dureza. Para las condiciones de extruido, sobresaturado y sobreenevejecido se muestran en las Figs. A₂, A₄ y A₆ del apéndice A. En la Fig. 6.4 se hace una comparación de las gráficas esfuerzo-deformación reales para las cuatro condiciones

La región elástica en esta curva tiene el mismo comportamiento que en el diagrama esfuerzo deformación ingenieril, la diferencia se da después del esfuerzo de cedencia donde el flujo de esfuerzo se mantiene aproximadamente horizontal.

6.3.3.- Comparación entre las gráficas esfuerzo-deformación real e ingenieril.

En la Fig. 6.5 se hace una comparación entre las gráficas esfuerzo-deformación real e ingenieril de la probeta en la condición de máxima dureza, las Figs. A₇, A₈ y A₉ del apéndice A muestran las gráficas correspondientes para las condiciones de extruida, sobreenevejecida y sobresaturada .

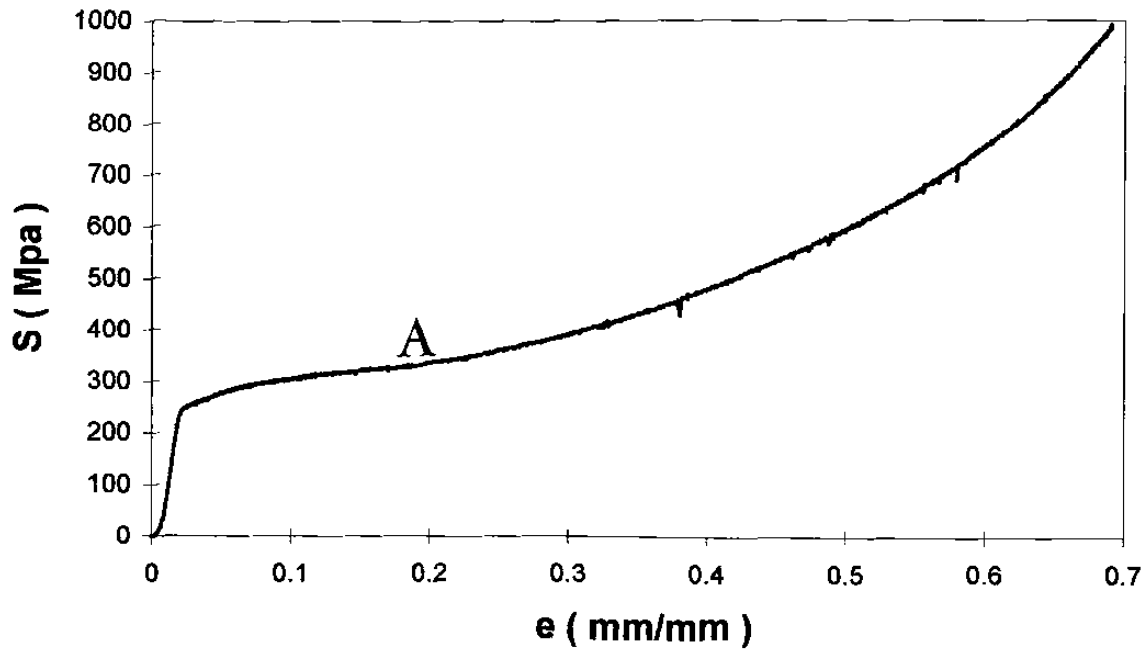


Fig. 6.1 Gráfica esfuerzo-deformación ingenieril de la muestra en la condición de máxima dureza

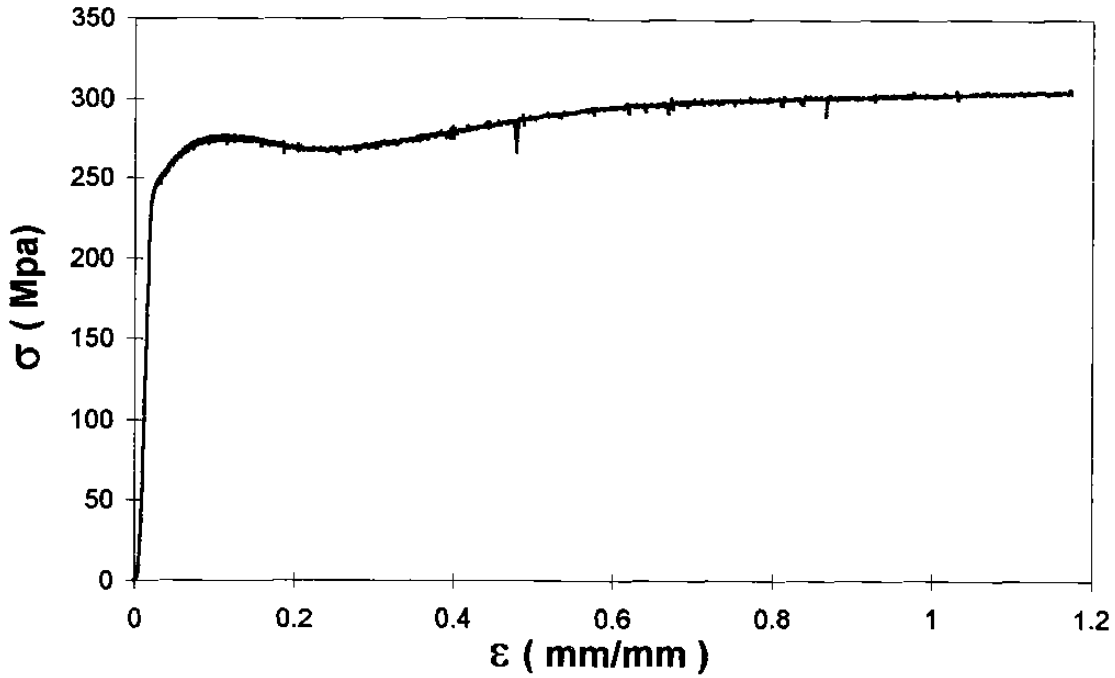


Fig. 6.2 Gráfica esfuerzo-deformación real de la muestra en la condición de máxima dureza

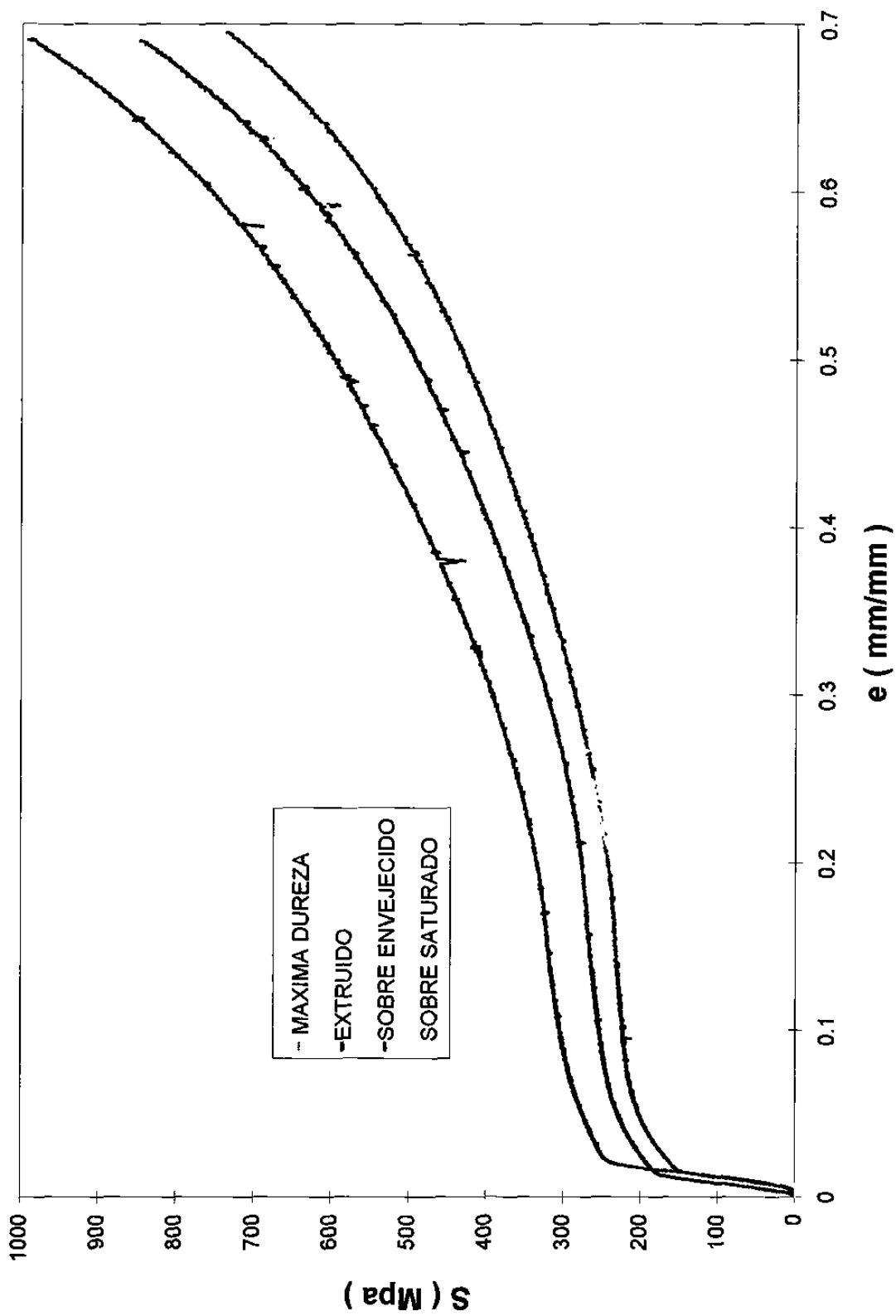


Fig. 6.3 Comparacion de las graficas esfuerzo-deformacion ingenieriles de las muestras en las cuatro condiciones

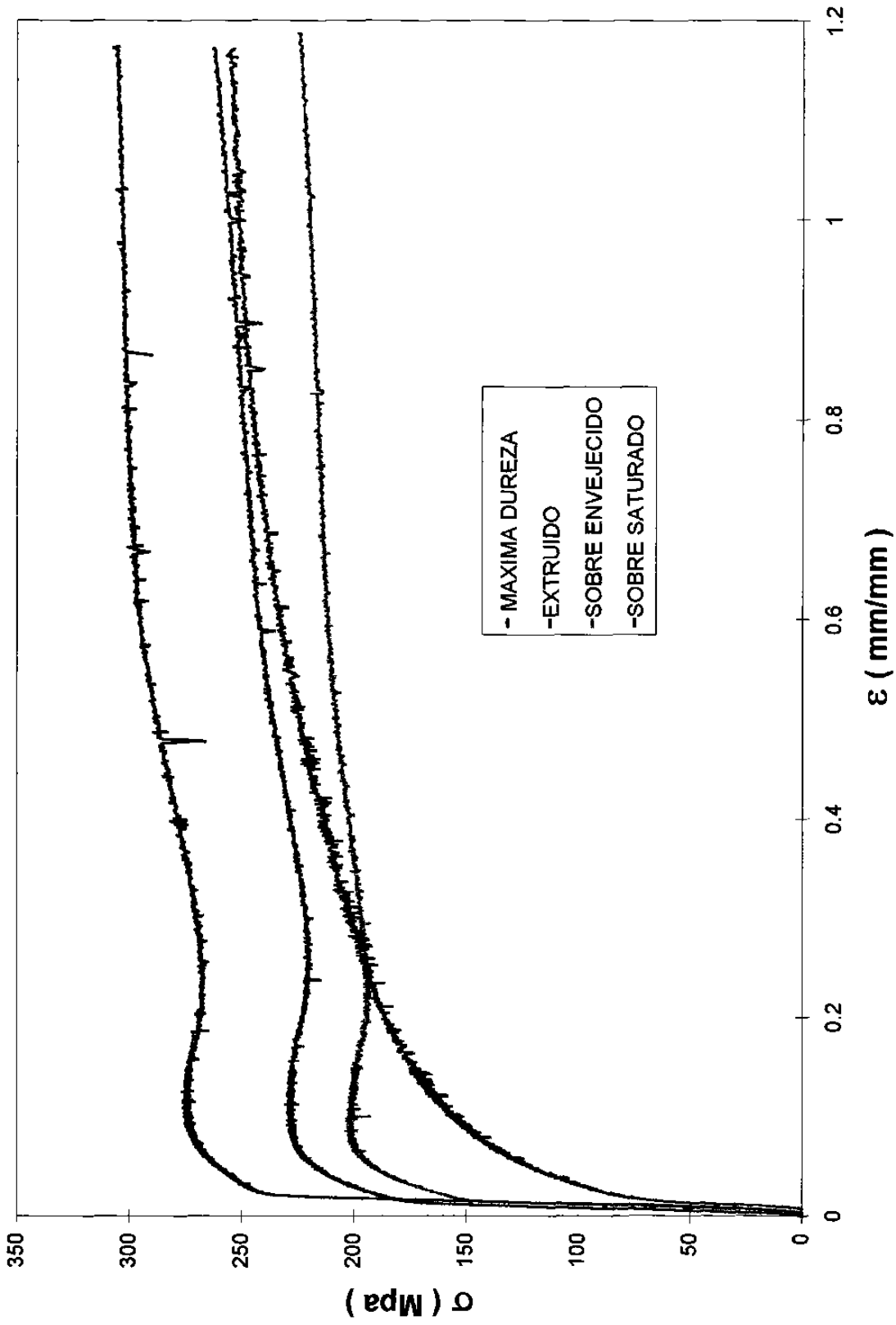


Fig. 6.4 Comparacion de las graficas esfuerzo-deformacion reales de las muestras en las cuatro condiciones

La diferencia entre las curvas real e ingenieril se dá en la región plástica, la curva real manifiesta un esfuerzo menor, ya que se calcula dividiendo la carga aplicada entre el valor instantáneo del área la cual es mayor que la inicial.

En la región elástica el comportamiento es el mismo , debido a que los valores de la deformacion son pequeños y la sección transversal casi no cambia. La diferencia entre la deformación real e ingenieril se aprecia después de una deformación de aproximadamente el 12 %, una deformación real del 59 % es equivalente al 100 % de la deformación ingenieril.

6.4.- Análisis de gráficas.

Para hacer el análisis de las gráficas es conveniente utilizar las reales en donde se considera el área y deformacion instantáneas. En la comparación de las cuatro gráficas se puede observar que el comportamiento en las condiciones de máxima dureza, extruido y sobreenejecido es similar, después del punto de cedencia el esfuerzo de flujo plástico es casi constante, ya que en ellas existen precipitados, la condición de máxima dureza tiene el valor de resistencia más alto y el más bajo corresponde a la condición de sobreenejecido.

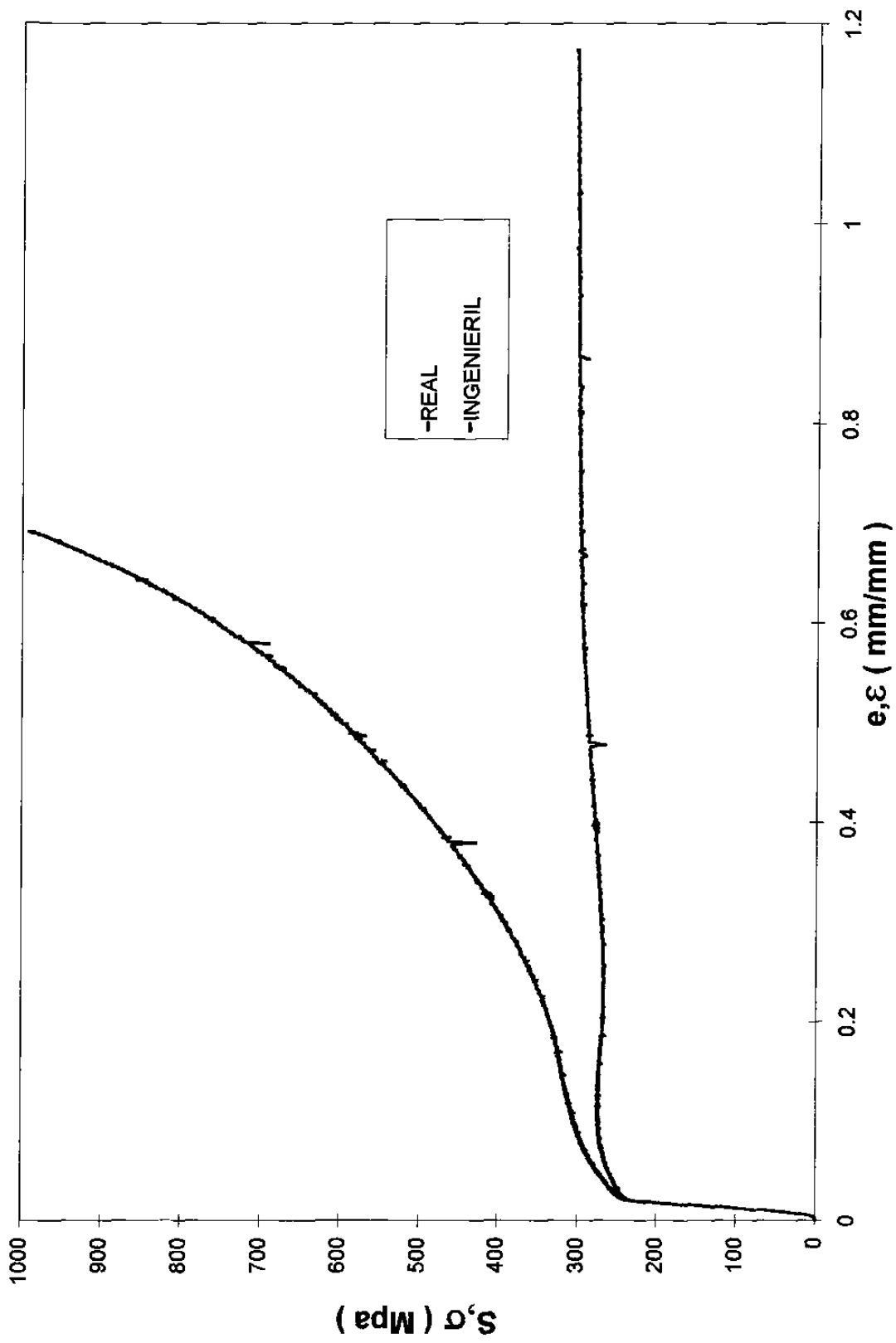


Fig. 6.5 Comparación entre las gráficas esfuerzo-deformación real e ingenieril de la muestra en la condición de máxima dureza

La curva que corresponde a la condición de sobresaturado, en la cual no existen precipitados, tiene un comportamiento muy diferente a las anteriores, después del punto de cedencia la curva se eleva continuamente, su deformación requiere del aumento constante de esfuerzo y el material se hace más resistente conforme el esfuerzo aumenta, esto se debe sólo al endurecimiento por deformación, en el cual las dislocaciones son detenidas por barreras tales como fronteras de grano, distorsión de red debido a la sobresaturación . El endurecimiento por deformación es importante en ciertos procesos de manufactura, particularmente en el formado de metales.

6.5.- Coeficiente de altura (H).

El coeficiente de altura (H), nos da una indicación del paralelismo de deformación de la probeta, si H es mayor o igual a 0.04, la prueba no es válida.

La tabla 4 muestra los valores de las cuatro alturas de cada probeta deformada en compresión en las diferentes condiciones, su promedio (h_f), desviación estandar (S_{h_f}) y el coeficiente de altura (H), los resultados muestran un valor menor a 0.04 por lo tanto las pruebas son válidas.

Tabla 4 Coeficientes de altura de las muestras en las cuatro condiciones

Dimensiones finales altura en mm	Máxima dureza	Extruida	Sobre envejecida	Sobre saturada
h_1 (centro)	4.96	4.98	4.50	4.91
h_2 (orilla)	4.89	4.96	4.45	4.89
h_3 (orilla)	4.91	4.97	4.48	4.86
h_4 (orilla)	4.92	4.96	4.45	4.88
h_f (promedio)	4.92	4.967	4.47	4.885
S_{hf} (Desviación)	0.025	0.008	0.021	0.018
H (Coef. de altura)	0.005	0.002	0.004	0.004

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El flujo plástico está en función de los precipitados, semicoherentes en dureza máxima e incoherentes en sobreenviejado. Deformándose plásticamente a un esfuerzo casi constante que depende de la energía necesaria para que las dislocaciones se muevan a través de ellos.

El esfuerzo de flujo es mayor en la condición de máxima dureza que en la de sobreenviejado.

El comportamiento de la condición sobresaturada es la típica del endurecimiento por deformación.

Aún con teflón en la superficie de la probeta existe fricción dando como resultado una inestabilidad plástica a partir del 30 % de deformación ingenieril.

Recomendaciones

Efectuar ensayos de compresión a diferentes velocidades de deformación para analizar su respuesta a esta condición..

Ensayos de compresión con diferentes materiales antifricción entre la muestra y los aditamentos de la máquina.

BIBLIOGRAFÍA

**ASM Handbook
Heat Treating
Volumen 4 ,1990**

**ASM Handbook
Mechanical Testing
Volumen 7, 1990**

**ASM Handbook
Properties and Selection Nonferrous Alloys
and Special-Purpose Materials
Volumen 2, 1990**

**B. Jaramillo, M. Cisneros, S. Valtierra
Identificación de precipitados por microscopia electrónica de transmisión
en una aleación A₃₁₉ tratada térmicamente
Instituto Tecnológico de Saltillo y Nematik, 1997**

Donald R. Askeland

La Ciencia e Ingeniería de los Materiales

Grupo Editorial Iberoamericana, 1987

Mickel P. Grovver

Fundamentos de Metalurgia Moderna

Ed. Prentice Hall 1a Edición 1991

J.W Martin

Precipitación Hardening

Pergamon Press, Oxford 1986

William F. Smith

Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales

Ed. Mc. Graw Hill 2a Edición, 1993

Sidney H. Avner

Introducción a la Metalurgia Física

Ed. Mc. Graw Hill 2a Edición, 1988

APÉNDICE A

Gráficas esfuerzo-deformación de los ensayos de compresión

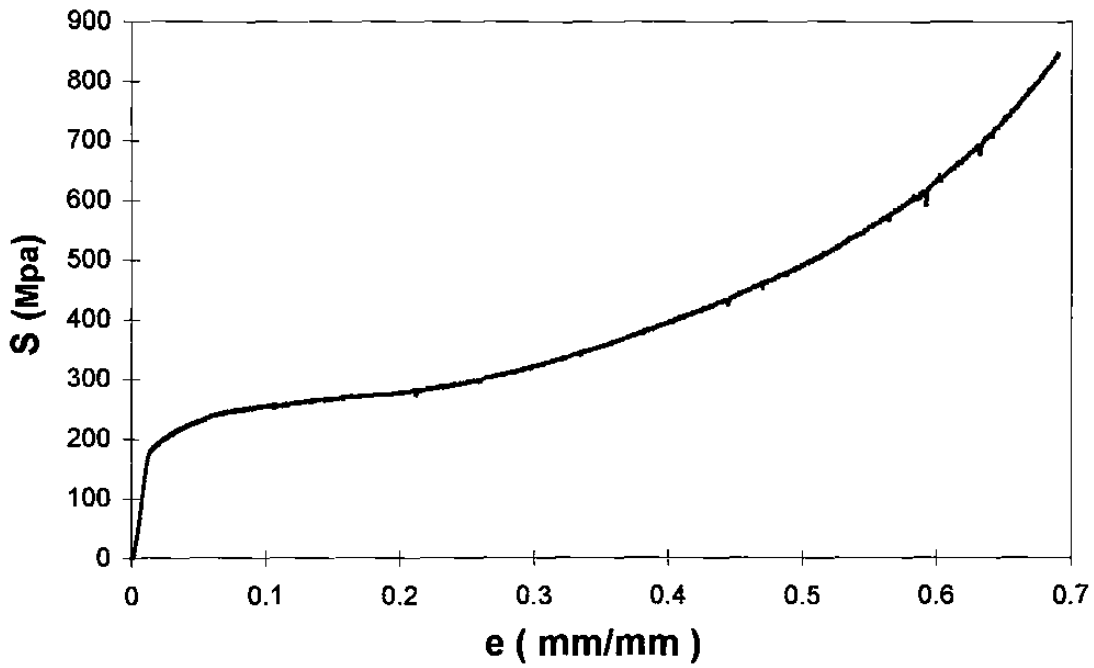


Fig. A1 Gráfica esfuerzo-deformación ingenieril de la muestra en la condición extruido

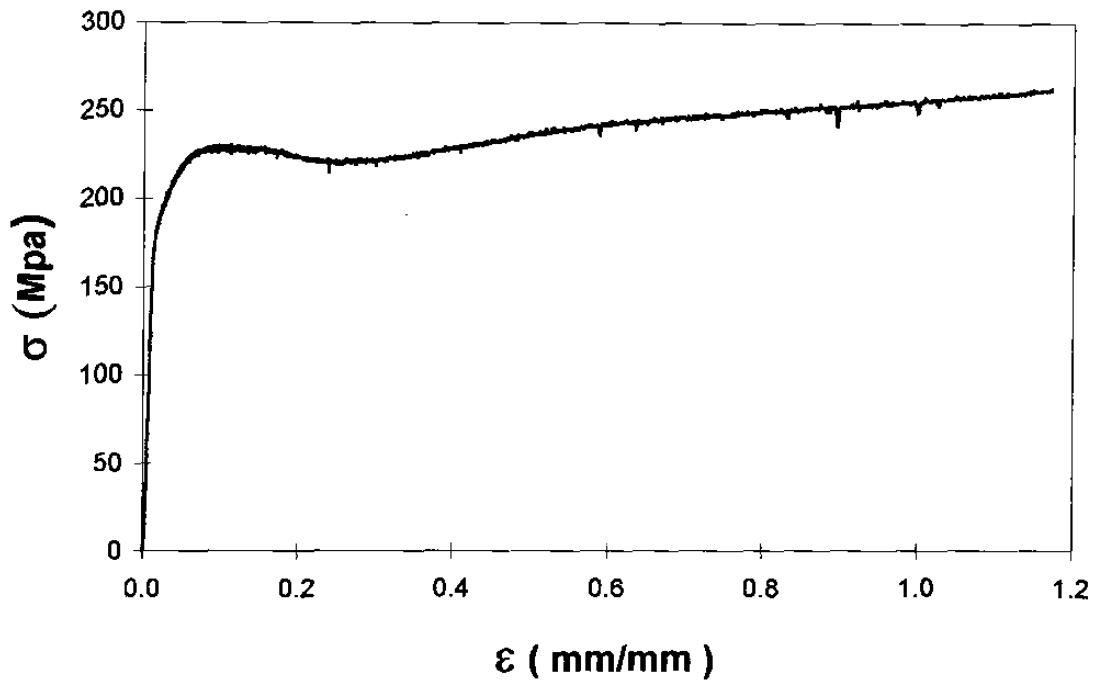


Fig. A2 Grafica esfuerzo-deformación real de la muestra en la condición extruido

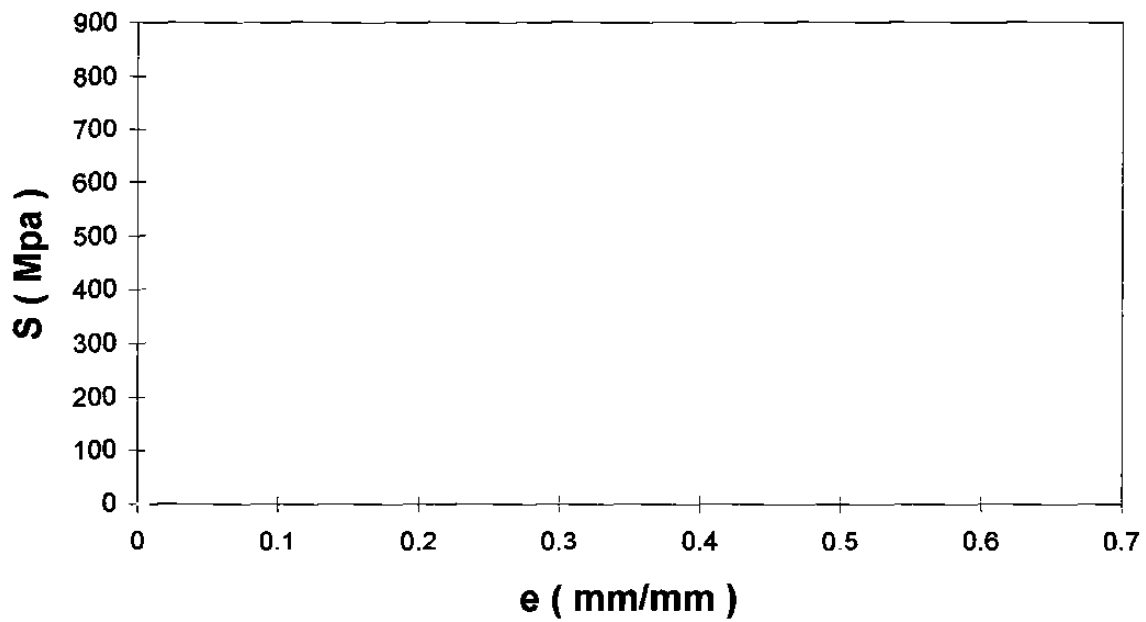


Fig. A3 Gráfica esfuerzo-deformación ingenieril de la muestra en la condición sobresaturado.

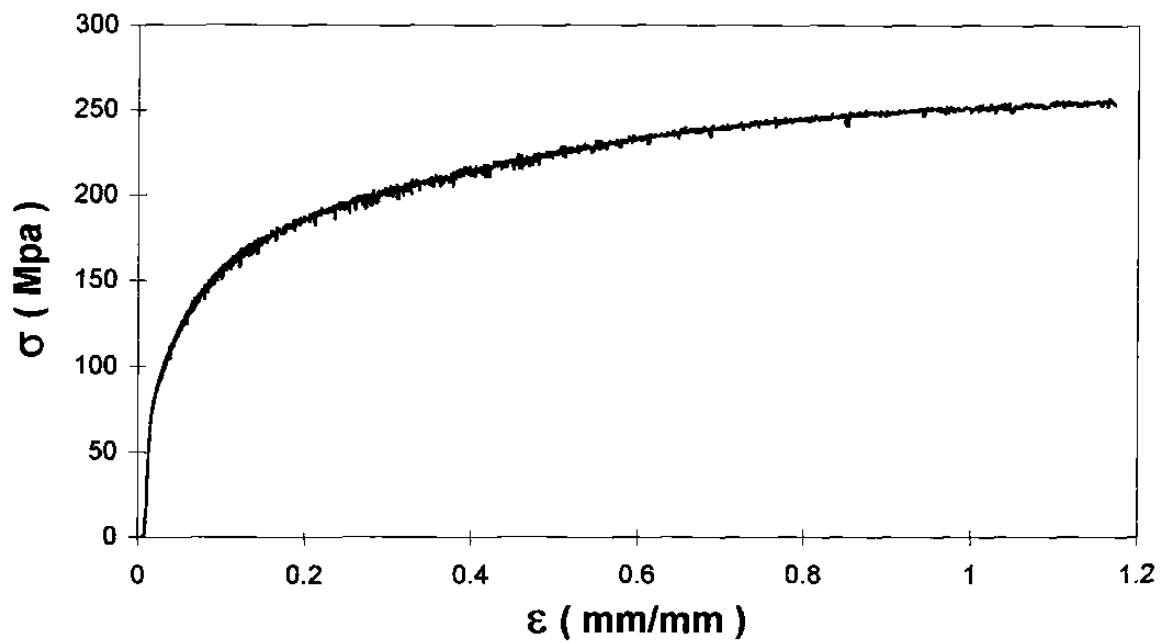


Fig. A4 Gráfica esfuerzo-deformación real de la muestra en la condición sobresaturado.

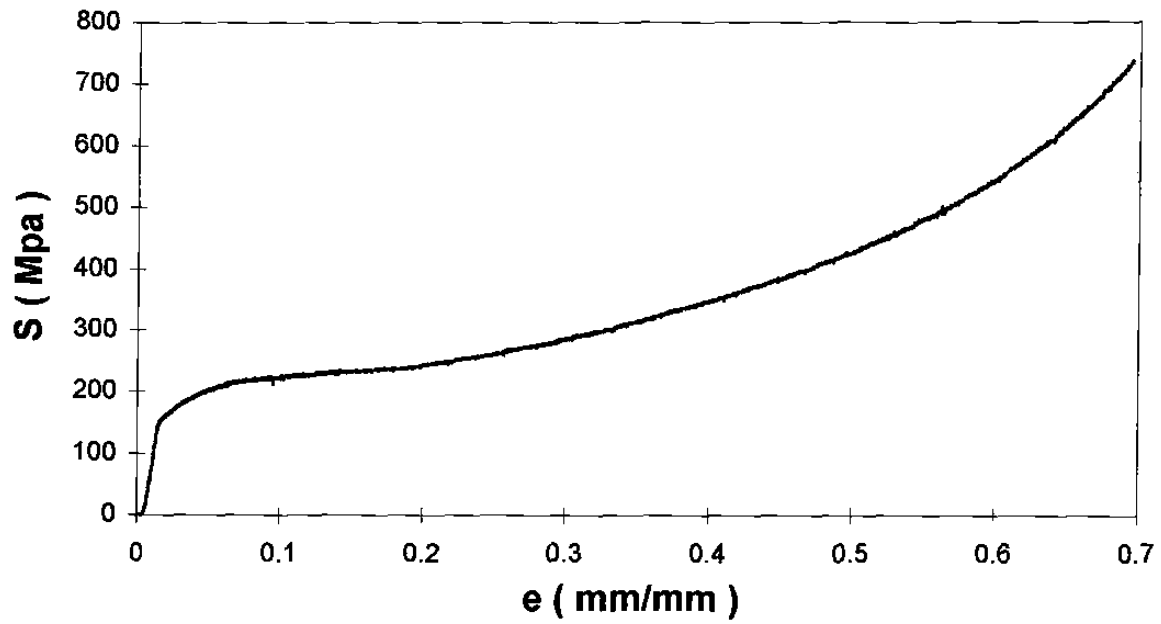


Fig. A5 Gráfica esfuerzo-deformación ingenieril de la muestra en la condición sobrevejecido

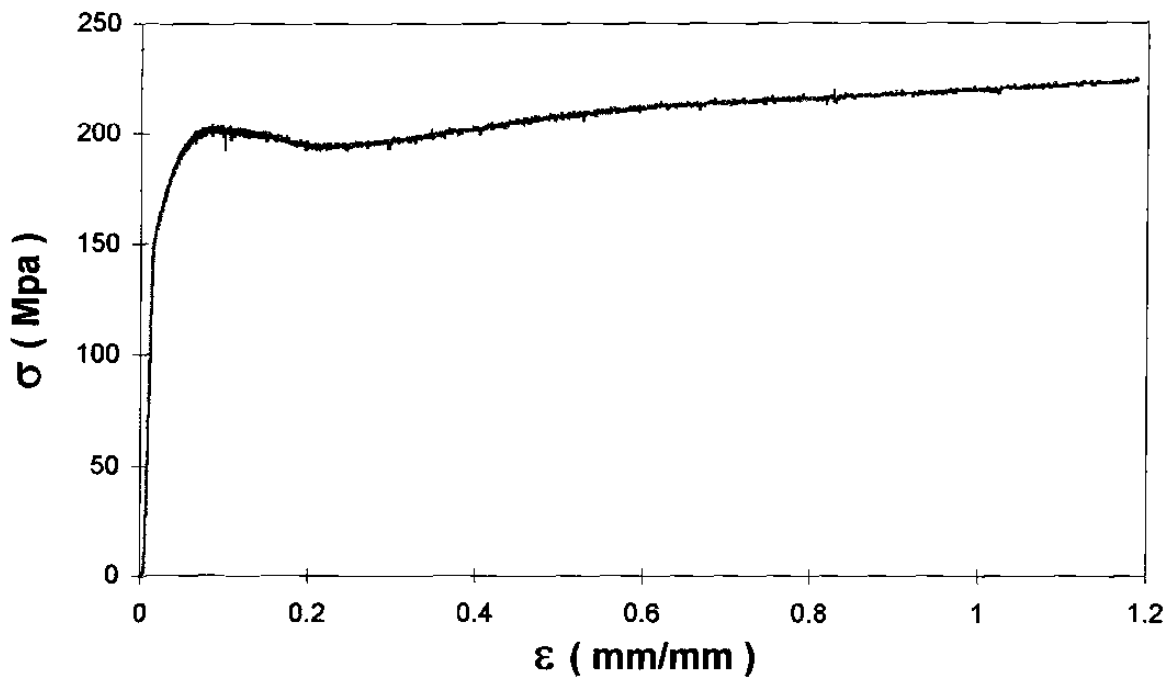


Fig. A6 Gráfica esfuerzo-deformación real de la muestra en la condición sobrevejecido

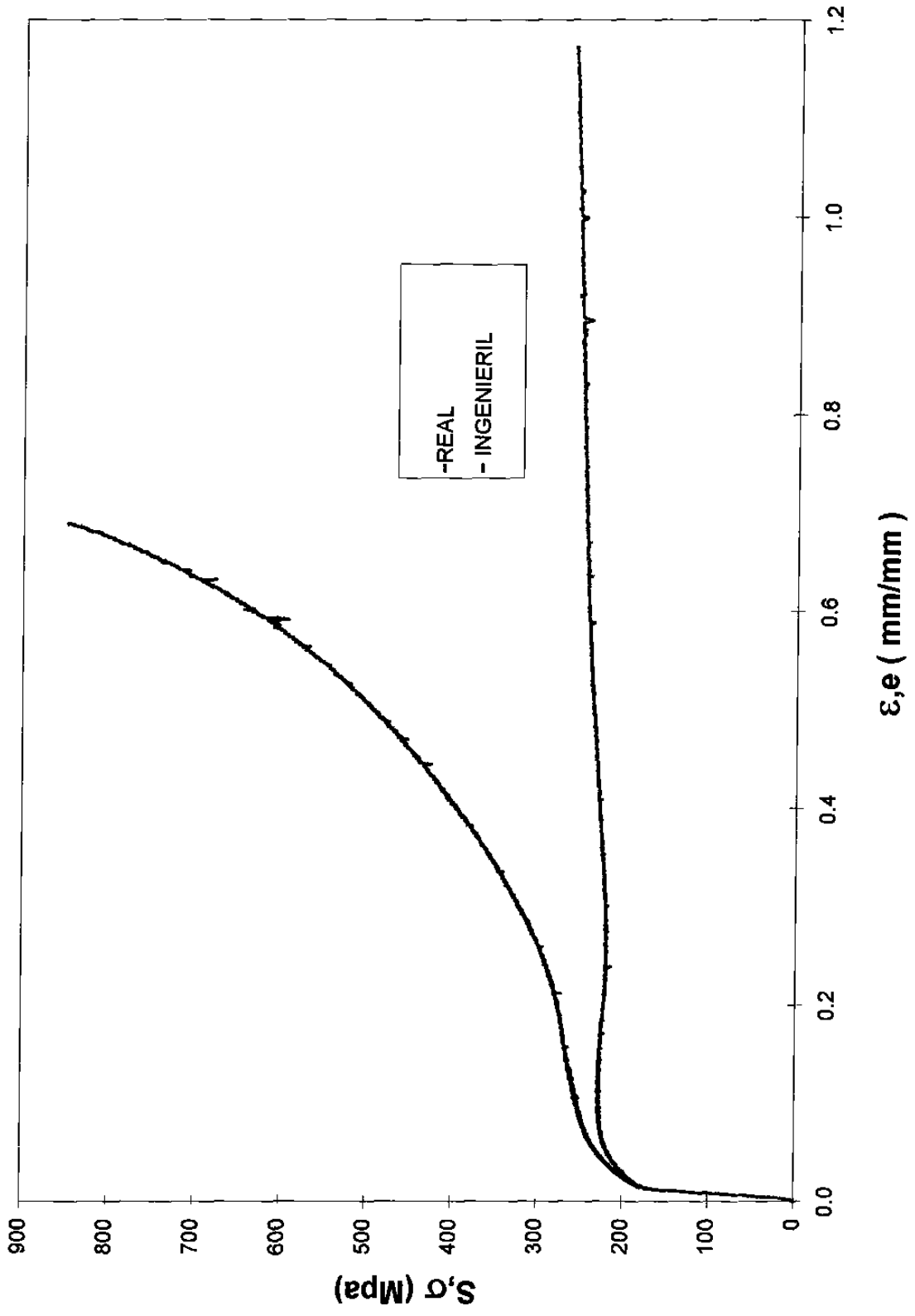


Fig. A7 Comparación entre las graficas esfuerzo-deformación real e ingenieril de la muestra en la condición extruido

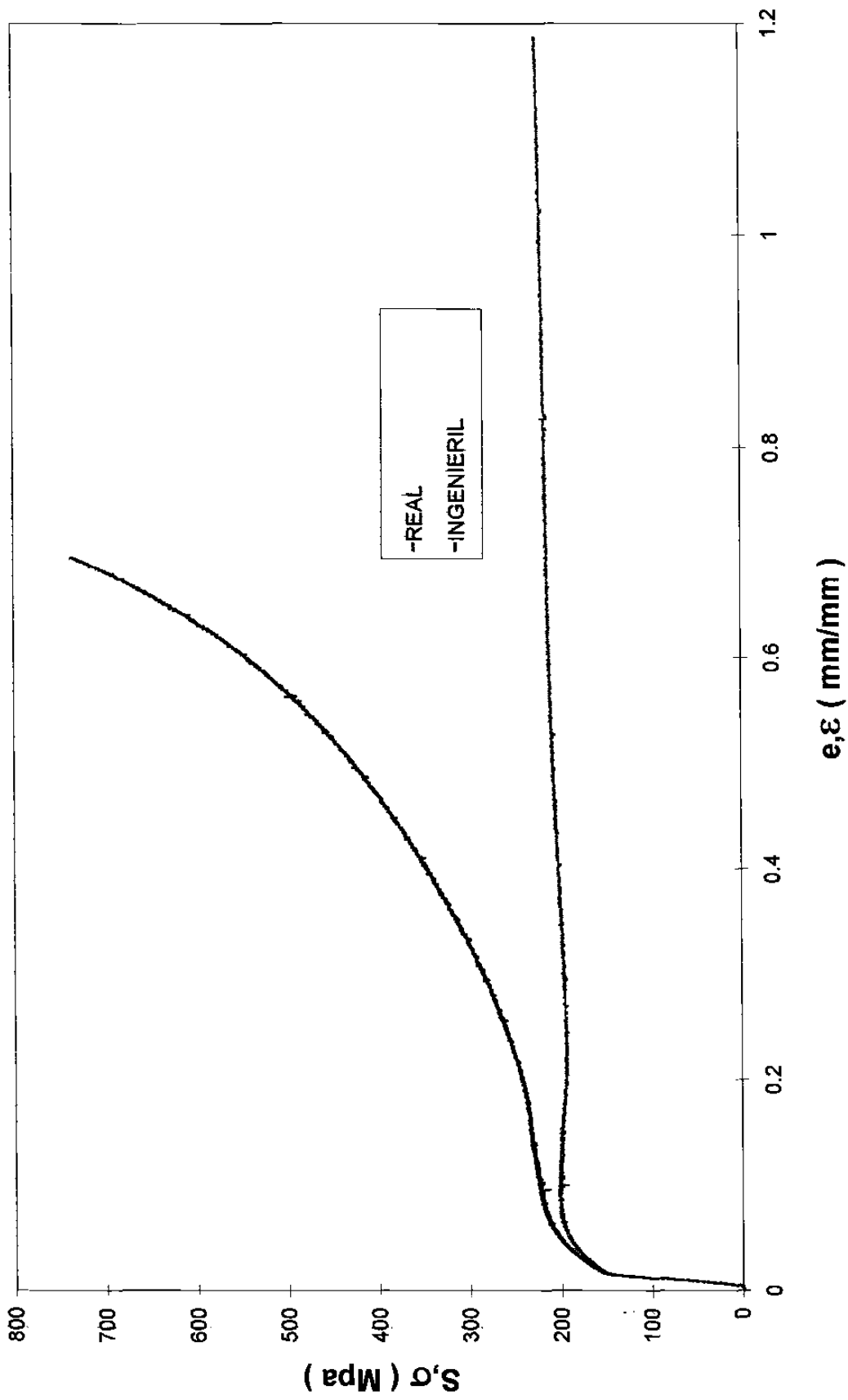


Fig. A8 Comparación entre las gráficas esfuerzo-deformación real e ingenieril de la muestra en la condición sobrevejecido.

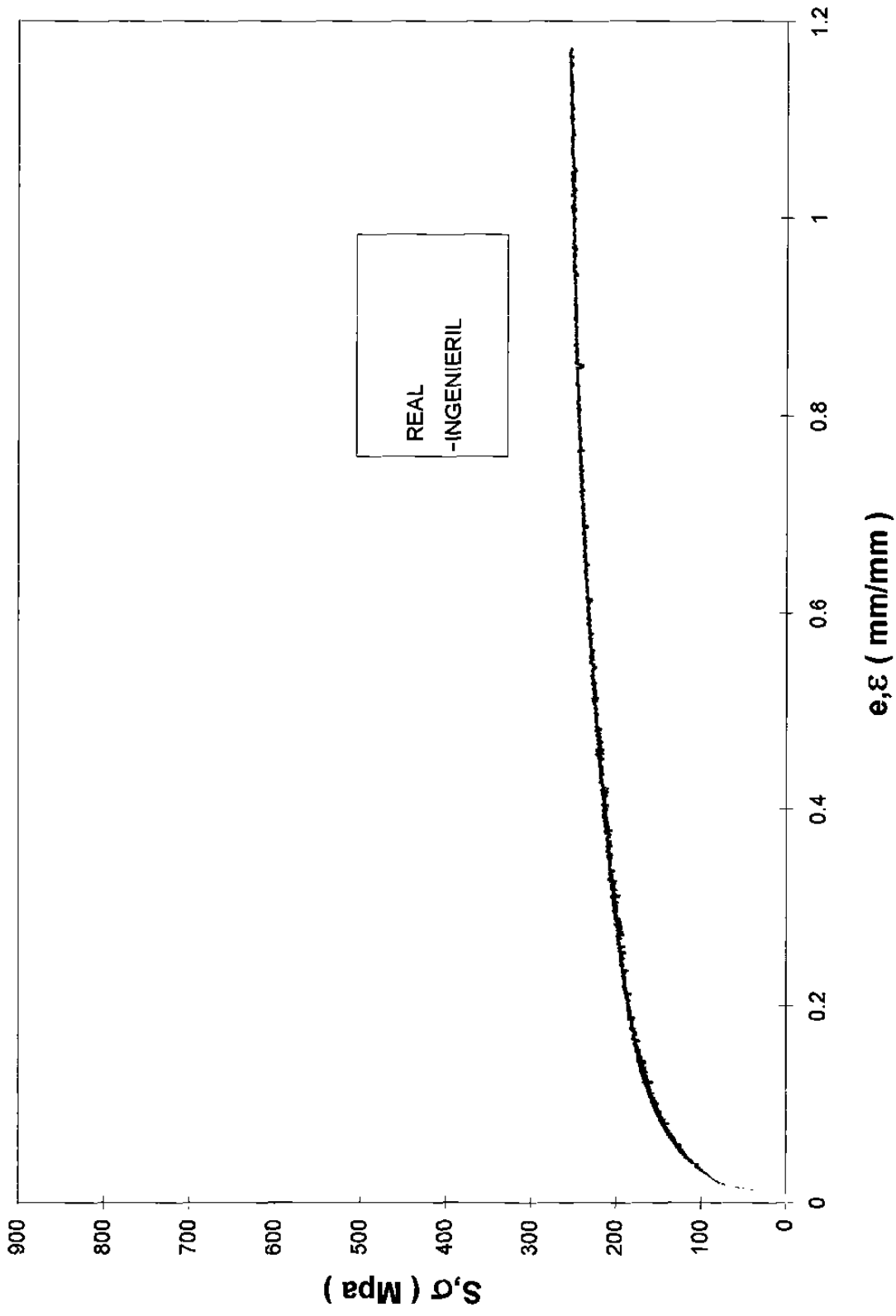


Fig. A9 Comparación entre las gráficas esfuerzo-deformación real e ingenieril de la muestra en la condición sobresaturado.

APÉNDICE B GLOSARIO

Aluminio.- metal blanco plateado, muy liviano, símbolo Al, número atómico 13, peso atómico 26.97, dúctil, maleable y excelente conductor de la electricidad, expuesto al aire se forma inmediatamente en su superficie una capa invisible de óxido de aluminio que lo protege impidiendo la oxidación. Se obtiene comercialmente por electrólisis del óxido de aluminio (bauxita), como es muy blando, se endurece agregándole pequeñas cantidades de magnesio, cobre, silicio y magnesio, reemplaza al acero en aplicaciones en que el poco peso y la resistencia específica a la corrosión son más importantes que la dureza.

Aluminio aleado.- Aluminio con cantidades de elementos de aleación agregados para efectuar cambios en las propiedades mecánicas o físicas.

Aleación.- Sustancia con propiedades metálicas y compuesta por dos o más elementos químicos de los cuales por lo menos uno es metal.

Densidad.- Masa por unidad de volumen de material, normalmente expresada en gr./cm^3

Diagrama de equilibrio.- Representación gráfica de los límites de temperatura y composición de campos de fase en un sistema de aleación como realmente existen bajo las condiciones específicas de calentamiento o enfriamiento.

Dislocación.- Imperfección lineal en la red de un material cristalino, la interferencia con el movimiento de las dislocaciones ayuda a explicar como se incrementa la resistencia mecánica en los materiales.

Dúctil.- Que puede estirarse, alargarse o adelgazarse

Endurecimiento.- Incrementar la dureza mediante un tratamiento adecuado, generalmente incluye calentamientos y enfriamientos, debe utilizarse en términos más específicos, como endurecimiento por precipitación, endurecimiento por envejecido, endurecimiento por deformación etc.

Endurecimiento por precipitación.- Tratamiento térmico especial de endurecimiento por dispersión. Se forma un precipitado coherente a través de un tratamiento por solución, un templado y un envejecido.

Envejecido.- En un metal o aleación es un cambio en las propiedades que generalmente ocurren con lentitud a temperatura ambiente y con mas rapidez a altas temperaturas.

Envejecimiento artificial.- Recalentamiento de una aleación tratada por solución y enfriada a una temperatura abajo de solvus para proporcionar la energía térmica requerida para que se forme un precipitado.

Envejecimiento natural.- Formación de un precipitado coherente de una aleación tratada por solución y enfriada a temperatura ambiente manteniendo esta temperatura por algún tiempo.

Esfuerzo ingenieril.- Carga o fuerza aplicada dividida entre el área transversal original de la probeta.

Esfuerzo real.- Carga o fuerza aplicada dividida entre el área instantánea.

Fase.- Material que tiene la misma estructura, composición y propiedades en su totalidad en condiciones de equilibrio.

Liquidus.- Línea que determina la temperatura a la cual empieza a formarse la primera porción sólida durante la solidificación.

Matriz.- Tipicamente el primer material sólido que se forma durante el enfriamiento de una aleación. Usualmente la matriz es continua y se precipita una segunda fase a partir de ella.

Microestructura.- Estructura de metales pulidos y atacados químicamente, revelada por un microscopio a una amplificación mayor a 10 diámetros

Precipitado.- Fase sólida que se forma a partir de la matriz original cuando se excede el límite de solubilidad.

Precipitado coherente.- Precipitado cuya estructura cristalina y arreglo atómico tienen una relación continua con la matriz de la cual se formó. El precipitado coherente proporciona una excelente interrupción del arreglo atómico en la matriz y un excelente endurecimiento.

Propiedades mecánicas.- Propiedades de un metal que revelan su comportamiento elástico e inelástico cuando se aplica una fuerza, son ejemplos el módulo de elasticidad, la elongación, el punto de fluencia etc.

Solución sólida.- Fase sólida que contiene una mezcla de más de un elemento, las cuales se combinan para presentar una composición uniforme en todas partes.

Solidus.- Línea de solubilidad que separa una región de fase sólida simple de una región de dos fases sólidas en el diagrama de fase.

Zonas Guiner-Preston.- Diminutas aglomeraciones de átomos que se precipitan de la matriz en las primeras etapas del endurecimiento por envejecido, aunque son coherentes con la matriz son muy pequeñas para proporcionar un endurecimiento óptimo.

LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS

CAPITULO 2	Página
Tabla 1 Resistencia a la corrosión relativa de aleaciones de aluminio	6
Tabla 2 Efecto del mecanismo de endurecimiento en el aluminio y en aleaciones de aluminio	8
 CAPITULO 3	
Fig. 3.1 Diagrama de fases Al-Cu (extremo rico en aluminio)	13
Fig. 3.2 Tratamiento térmico de precipitación 1) tratamiento de solución 2) enfriamiento rápido 3) precipitación	14
Fig. 3.3 Efecto de la temperatura y el tiempo durante el tratamiento de precipitación a) temperatura alta b) temperatura baja	19
Fig. 3.4 Características del envejecido en una aleación 6061 en función del tiempo y la temperatura	20
Fig. 3.5 a) corte de un precipitado b) rodeo de precipitados	21
Fig. 3.6 Diagrama de equilibrio aluminio-silicio de magnesio	24
 CAPITULO 4	
Fig. 4.1 Probetas para ensayos de compresión en materiales metálicos	29
Fig. 4.2 Relaciones entre esfuerzo y deformación en muestras sometidas a compresión	32
Fig. 4.3 Efecto de abarrilamiento en un ensayo de compresión 1) inicio del ensayo 2) después de la compresión	
Fig. 4.4 Vista de una aleación de aluminio 7075-T ₆ comprimida un 72% mostrando el efecto piel de naranja y agrietamiento	35

Fig. 4.5	Macrogrietas en una probeta de acero AISI-SAE 4340 comprimida un 42 %	36
----------	---	----

CAPITULO 5

Fig. 5.1	Microestructura de una aleación de aluminio 6063 a) sentido transversal al extruido b) sentido longitudinal al extruido	40
Fig. 5.2	Secuencia de los pasos para obtener la muestra a partir de la barra	41
Fig. 5.3	Muestras en el momento de terminar el tratamiento de solubilización	42
Fig. 5.4	Muestras que recibieron tratamiento de envejecido artificial	43
Fig. 5.5	Muestras dentro del horno sometidas a tratamiento de sobre-envejecido.	44
Fig. 5.6	Muestra antes de comprimirla comparada con una deformada un 70 %	45

CAPITULO 6

Tabla 3	Microdurezas Vickers para condiciones de sobresaturado, máxima dureza, sobre-envejecido y extruido	47
Fig. 6.1	Gráfica esfuerzo deformación ingenieril de la muestra en la condición de máxima dureza	51
Fig. 6.2	Gráfica esfuerzo deformación real de la muestra en la condición de máxima dureza	51
Fig. 6.3	Comparación entre las gráficas esfuerzo deformación ingenieriles de las muestras en las cuatro condiciones	52
Fig. 6.4	Comparación de las gráficas esfuerzo deformación reales de las muestras en las cuatro condiciones	53
Fig. 6.5	Comparación de las gráficas esfuerzo deformación real e ingenieril de la muestra en la condición de máxima dureza	55
Tabla 4	Coefficientes de altura de las muestras en las cuatro condiciones	57

APÉNDICE A

Fig. A ₁	Gráfica esfuerzo- deformación ingenieril de la muestra en la condición extruido	63
Fig. A ₂	Gráfica esfuerzo- deformación real de la muestra en la condición extruido	63

Fig. A ₃	Gráfica esfuerzo- deformación ingenieril de la muestra en la condición sobresaturado	64
Fig. A ₄	Gráfica esfuerzo- deformación real de la muestra en la condición sobresaturado	64
Fig. A ₅	Gráfica esfuerzo- deformación ingenieril de la muestra en la condición sobreenviejecido	65
Fig. A ₆	Gráfica esfuerzo- deformación real de la muestra en la condición sobreenviejecido	65
Fig. A ₇	Comparación entre las gráficas esfuerzo- deformación real e ingenieril de la muestra en la condición extruido	66
Fig. A ₈	Comparación entre las gráficas esfuerzo- deformación real e ingenieril de la muestra en la condición sobreenviejecido	67
Fig. A ₉	Comparación entre las gráficas esfuerzo- deformación real e ingenieril de la muestra en la condición sobresaturado	68

REFERENCIAS

- Ref . 1 Mikell P. Grovver**
Fundamentos de Manufactura Moderna
Ed. Prentice Hall 1a Edición 1991
- Ref . 2 Earle M. Jorgensen Company 1997**
- Ref . 3 Donald R. Askeland**
La Ciencia e Ingeniería de Los Materiales
Ed. Grupo Editorial Iberoamericana 1987
- Ref . 4 William F. Smith**
Fundamentos de la ciencia e Ingeniería de Materiales
Ed. Mc. Graw Hill 2a Edición 1993
- Ref . 5 ASM HandBook**
Heat Treating
Volumen 4 ,1990

- Ref . 6 A. Michel, J. Philbert, y J. Talbot**
Metalurgia General
Editorial Hispano Europea
Barcelona España
- Ref . 7 Sidney H. Avner**
Introducción a La Metalurgia Física
Ed. Mc. Graw Hill 2a Edicion, 1998
- Ref . 8 Davis, Troxell y Wiskocil**
Ensaye e Inspección de Materiales en Ingeniería
Editorial C.E.C.S.A.
- Ref . 9 ASM Handbook**
Mechanical Testing
Volumen 7, 1990
- Ref . 10 J.W Martin**
Precipitación Hardening
Pergamon Press, Oxford 1986
- Ref . 11 B. Jaramillo, M. Cisneros, S. Valtierra**
Identificación de precipitados por microscopia electrónica de transmisión
en una aleación A₃₁₉ tratada térmicamente
Instituto Tecnológico de Saltillo y Nemak 1997

- Ref . 12 B. Roebuck, J.D. Lord, R.K. Varma y M.S. Loveday**
Measuring Flow Stress in Hot Axisymmetric Compression Tests
Febrero de 1997
- Ref. 13 J.L. Cavazos**
Tratamientos Termicos en una Aleacion de Aluminio 6063
Tesis Doctoral , Junio de 1998
- Ref. 14 ASM Handbook**
Properties and Selection Nonferrous Alloys
and Special-Purpose Materials
Volumen 2, 1990
- Ref. 15 Ingenieria Metalurgica**
Raymond Higgins
Editorial Continental S.A. Mexico, 1980

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Ma. de Jesús Náñez Rodríguez

Candidato para el grado de
Maestro en Ciencias con Especialidad en Materiales

Tesis: Comportamiento de una aleación de aluminio tratada térmicamente bajo carga de compresión

Campo de Estudio: Ciencias Exactas

Biografía:

Datos Personales: Nacida en Monterrey N.L. el 30 de Marzo de 1954, hija del Sr. Raúl Náñez González y Sra. Emma Rodríguez Silva.

Educación: Egresada de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de N.L., grado obtenido Ingeniero Mecánico Administrador en 1975.

Experiencia Profesional: Jefe de Publicidad en la Empresa Conductores Monterrey S.A. de 1976 a 1982, Catedrático de la F.I.M.E. U.A.N.L. de 1984 a la fecha.

