

Capítulo 4

Procedimiento Experimental

4.1 Introducción

El uso extensivo de estudios experimentales preliminares al diseño y construcción de nuevos elementos mecánicos o estructurales es un hecho significativo y bien reconocido del desarrollo técnico.

La producción masiva satisfactoria depende de la inspección y control de la calidad de los productos manufacturados, lo cual implica un sistema de muestreo y ensaye mediante el cual se determinen las propiedades de los materiales involucrados.

Estos elementos mecánicos o estructurales de los cuales se habla, en muchas ocasiones se ven sometidos a condiciones de carga muy variadas, pudiendo existir cambios en la intensidad, velocidad y tiempo de aplicación.

En lo que respecta al material, el comportamiento de éste y por ende sus propiedades mecánicas, se ven afectadas por factores tales como su microestructura, condición de tratamiento en que se encuentre y la velocidad de deformación a que es sometido, entre otros.

En el presente trabajo se analizan las propiedades mecánicas de una aleación de aluminio tipo 319 cuya microestructura se presenta en dos condiciones, a saber: una muestra con modificación en su fase eutéctica así como refinamiento de grano, la otra presenta sólo modificación de la fase eutéctica.

Las piezas fueron sometidas a tres tratamientos térmicos para su estudio, siendo éstos: a) tratamiento térmico de solubilizado (T4), b) tratamiento de envejecimiento (T6) y c) tratamiento de sobre-envejecido o estabilizado (T7). Cabe señalar que el tratamiento de solubilizado, previo a los otros tratamientos, se llevó a cabo a tres distintas temperaturas (400, 440, y 480°C) con el objeto de observar la variación de las propiedades mecánicas conforme se incrementa la temperatura de solubilización.

Las muestras fueron sometidas a ensayos estáticos de compresión efectuados a velocidades de desplazamiento de cabezal constante de 0.5, 5, y 50 mm/min, produciendo velocidades de deformación inicial en las muestras de 0.00046, 0.0046 y 0.046 1/s.

4.2 Caracterización del Material

Con el propósito de conocer las características microestructurales presentes en las dos condiciones de estructura, se llevaron a cabo evaluaciones en el nivel de modificación y el tamaño de grano; la composición química de estas dos condiciones de estructura se muestra en las Tablas 4.1 y 4.2. En ambas aleaciones se pueden observar niveles semejantes de estroncio, el cual se encuentra en cantidad suficiente para llevar a cabo la modificación de la fase eutéctica de silicio; por otra parte, la aleación modificada y refinada presenta esta última característica debido a que posee mayor contenido de titanio que la aleación únicamente modificada. El procedimiento mediante el cual se evaluó el efecto tanto del elemento modificador como del elemento refinador de grano se describe a continuación:

Se tomaron muestras del material y se desbastaron con lija de carburo de silicio hasta el grado 2400, para después ser pulidas con alúmina de 1 μm ; finalmente se limpiaron con alcohol etílico y se secaron con aire caliente.

Las muestras se analizaron en la condición de pulido en un microscopio óptico Olympus PMG 3, obteniendo las imágenes mostradas en las figuras 4.1 y 4.2 para las condiciones de estructura modificada y modificada y refinada respectivamente. A partir de ellas y por comparación con la tabla de control de microestructura en aleaciones Al-Si hipoeutécticas, elaborada por el Comité de Análisis Térmico de la AFS (American Foundrymen's Society) se determinó que el nivel de modificación presente en ambas condiciones de estructura era de 4 a 5.

Por otra parte, para obtener las mediciones del tamaño de grano, se sometieron las muestras en la condición de pulido a un ataque químico llevado a cabo por inmersión en solución Keller compuesta por 2 ml HF, 3 ml de HCl, 5 ml de HNO_3 en 100 ml de agua; el ataque se efectuó durante un tiempo de 5 minutos.

Con este tratamiento y mediante el método de intercepción lineal según la norma ASTM E112 se observaron a través del estereógrafo Olympus SZH 10 las imágenes mostradas en las figuras 4.3 y 4.4 en las cuales, con el método antes descrito, se determinó un tamaño de grano de 620 μm (mediano) en la condición de estructura modificada y refinada, mientras que para la aleación únicamente modificada se obtuvo un tamaño de grano de 1300 μm (grueso).

Tanto en el análisis del tamaño de grano como en el del nivel de modificación, se contó con la ayuda del analizador de imágenes Image Device Matrix utilizando el software Clemex Vision versión 2.2 b.

4.3 Tratamiento Térmico

El material se preparó en probetas cilíndricas para compresión de 18 mm de altura y 12 mm de diámetro (razón de aspecto 1.5) y se sometió a los tratamientos térmicos que se describen en el siguiente apartado:

4.3.1 Tratamiento Térmico de Solubilizado

Con el objeto de observar la evolución de las propiedades mecánicas del material con la temperatura de solubilizado, se obtuvieron muestras solubilizadas a tres temperaturas distintas:

| | |
|---------------------|---|
| Solubilizado tipo A | 400°C durante 6 hrs. seguido de enfriamiento rápido en agua |
| Solubilizado tipo B | 440°C durante 6 hrs. seguido de enfriamiento rápido en agua |
| Solubilizado tipo C | 480°C durante 6 hrs. seguido de enfriamiento rápido en agua |

El número de muestras sobre las cuales se realizaron los diferentes tratamientos térmicos se indica al término de éstos.

Trabajos previos [1] muestran que para este tipo de aleaciones, la temperatura máxima de solubilizado se encuentra en el orden de los 483 y 514°C, intervalo en el cual solidifica la fase $Al+Al_2Cu+Si+Al_5Mg_8Cu_2Si_6$ (eutéctico) el cual establece el límite superior de la temperatura de solubilizado (fig. 4.5).

Las muestras se calentaron en un horno eléctrico de resistencias Lindberg durante el tiempo y temperaturas indicadas. Se llevó a cabo un estricto control de las temperaturas de tratamiento mediante el empleo de termopares tipo K de 1.6 mm. de diámetro. Estos termopares fueron colocados sobre las muestras,

monitoreando así la evolución térmica mediante un equipo de análisis térmico y cuyas curvas de calentamiento se muestran en la figura 4.6. El enfriamiento rápido se realizó mediante la inmersión en agua de las piezas justo después de las 6 horas que duró el tratamiento de solubilizado; las curvas de este enfriamiento se muestran en la figura 4.6.

4.3.2 Tratamiento de Endurecimiento por Envejecimiento (T6)

Una vez concluido el enfriamiento rápido como parte del tratamiento de solubilizado, se procedió a efectuar el tratamiento de envejecimiento, en el cual se lleva el material a una condición metaestable de alta dureza. Esto se consiguió al calentar el material a una temperatura de 160°C durante un período de tiempo de dos horas [2] a lo cual le siguió un enfriamiento al aire libre. Para este tratamiento se utilizó un horno eléctrico de resistencias Felisa capaz de controlar hasta los 300°C; nuevamente, para dar seguimiento a la evolución térmica de las piezas se utilizaron termopares tipo K cromel-alumel de 1.6 mm. conectados al equipo de análisis térmico. Las curvas respectivas de calentamiento se muestran en la figura 4.7a.

Este tratamiento de envejecimiento se realizó sobre las muestras que fueron sometidas a los tres tratamientos de solubilizado, por lo que una vez concluida esta fase se contó con el siguiente material:

- muestras con solubilizado tipo A (400°C)
- muestras con solubilizado tipo B (440°C)
- muestras con solubilizado tipo C (480°C)

- muestras envejecidas con tratamiento previo de solubilizado tipo A
- muestras envejecidas con tratamiento previo de solubilizado tipo B
- muestras envejecidas con tratamiento previo de solubilizado tipo C

4.3.3 Tratamiento Térmico de Sobreenvejecido o Estabilizado (T7)

Un número de muestras solubilizadas en sus tres tipos fueron sometidas a esta clase de tratamiento, el cual produce piezas estables aunque con sacrificio en algo de su resistencia. Este tratamiento se realizó en el horno de resistencias Felisa; las muestras se llevaron a 250°C durante un tiempo relativamente amplio de cuatro horas con el objeto de estabilizar la estructura [2], siguiendo a ésto un enfriamiento al aire libre. La figura 4.7b muestra el seguimiento del calentamiento de las piezas detectado por el equipo de análisis térmico.

Con este tratamiento se concluyó la etapa de tratamientos térmicos, lo cual proporcionó el material que más tarde se llevó a la máquina universal de pruebas:

- muestras con solubilizado tipo A (400°C)
- muestras con solubilizado tipo B (440°C)
- muestras con solubilizado tipo C (480°C)

- muestras envejecidas con tratamiento previo de solubilizado tipo A
- muestras envejecidas con tratamiento previo de solubilizado tipo B
- muestras envejecidas con tratamiento previo de solubilizado tipo C

- muestras sobreenvejecidas con tratamiento previo de solubilizado tipo A
- muestras sobreenvejecidas con tratamiento previo de solubilizado tipo B
- muestras sobreenvejecidas con tratamiento previo de solubilizado tipo C

Cada uno de los nueve tratamientos térmicos indicados se realizó sobre seis muestras de material, tres para la aleación de estructura modificada y tres para la aleación de estructura modificada y refinada. Cada muestra del grupo de tres se sometió a una velocidad de deformación diferente mencionadas en el apartado 4.1

4.4 Pruebas de Microdureza

Después de cada tratamiento térmico se efectuaron pruebas de microdureza Vickers sobre una muestra del material tratado térmicamente con el objeto de observar el efecto del tratamiento sobre la dureza del material. Estas pruebas de dureza se realizaron en un microdurómetro Shimadzu, utilizando una carga de 1 kg durante 15 segundos.

El número de dureza Vickers es la razón entre la carga aplicada y el área de la impresión del indentador. Este indentador es una pirámide de diamante de base cuadrada, teniendo como ángulo entre caras opuestas 136° (fig. 4.8). Obteniendo un promedio entre las diagonales de la indentación se obtiene el número de dureza Vickers mediante la siguiente fórmula [3]:

$$HV = \frac{2P \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{D^2} = \frac{1.8544 \cdot P}{D^2}$$

en la cual:

P; carga aplicada, kg.

D; diagonal promedio de la impresión

θ ; ángulo entre caras opuestas del penetrador

Las muestras sobre las cuales se realizaron estas pruebas de dureza fueron previamente pulidas mediante varios pasos en lija de papel de carburo de silicio, seguido de un pulido en paño utilizando alúmina de $1\mu\text{m}$, ésto con el fin de efectuar con mayor precisión las mediciones. Para cada condición de tratamiento térmico se realizaron cinco ensayos, reportando el promedio de éstos como la dureza proporcionada por el tratamiento.

4.5 Ensayos de Compresión

Una vez efectuado el tratamiento térmico en las probetas, se procedió a efectuar los ensayos de compresión. Para este fin se utilizó una máquina universal Instron en la cual una celda de carga colocada sobre uno de los cabezales envía la señal al programa de captura de datos, registrándose en él tanto la carga como el desplazamiento entre cabezales.

Las caras de las muestras en contacto con las herramientas de compresión fueron cubiertas con cinta de teflón, esto con el objeto de obtener una reducción en el coeficiente de fricción generado en las superficies de contacto.

Las pruebas se realizaron a velocidad de desplazamiento de cabezal constante, resultando en velocidades de deformación inicial de 0.00046, 0.0046 y 0.046 s⁻¹. Las figuras 4.9 y 4.10 muestran la condición que guardaron algunas probetas después de efectuada la compresión.

Bibliografía

- [1].- S. Cano, Tesis de Maestría " Análisis Térmico en una Aleación Al-Si tipo 319", UANL, México (1996).
- [2].- Heat Treating, ASM Handbook Vol 4, (1991) pp 849,850.
- [3].- Mechanical Testing, ASM Handbook Vol 8, (1985) pp 90-94

Tablas

Tabla 4.1 Composición Química de la Aleación Modificada

| | | | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Si | Cu | Fe | Mn | Mg | Zn | Ti | Cr | Sn |
| 7.32 | 3.33 | 0.619 | 0.42 | 0.294 | 0.715 | 0.068 | 0.03 | 0.017 |
| Ni | Pb | Na | Sr | P | B | Ca | Sb | Al |
| 0.038 | 0.051 | <0.00010 | 0.01397 | 0.00083 | 0.00059 | 0.00021 | 0.01497 | 87.07 |

Tabla 4.2 Composición Química de la Aleación Modificada y Refinada

| | | | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Si | Cu | Fe | Mn | Mg | Zn | Ti | Cr | Sn |
| 7.42 | 3.3 | 0.658 | 0.418 | 0.343 | 0.661 | 0.166 | 0.035 | 0.016 |
| Ni | Pb | Na | Sr | P | B | Ca | Sb | Al |
| 0.037 | 0.045 | 0 | 0.01336 | 0.0007 | 0.00067 | 0.00553 | 0.01444 | 86.87 |

Figuras

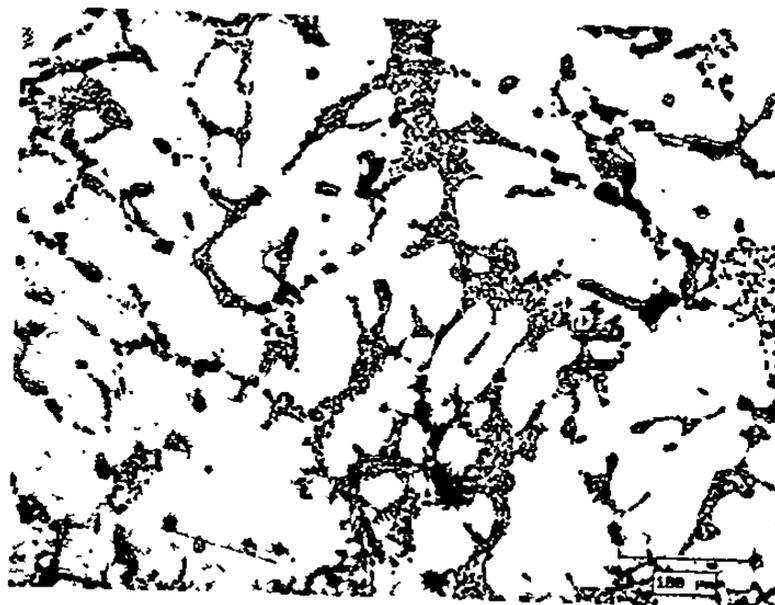


a)

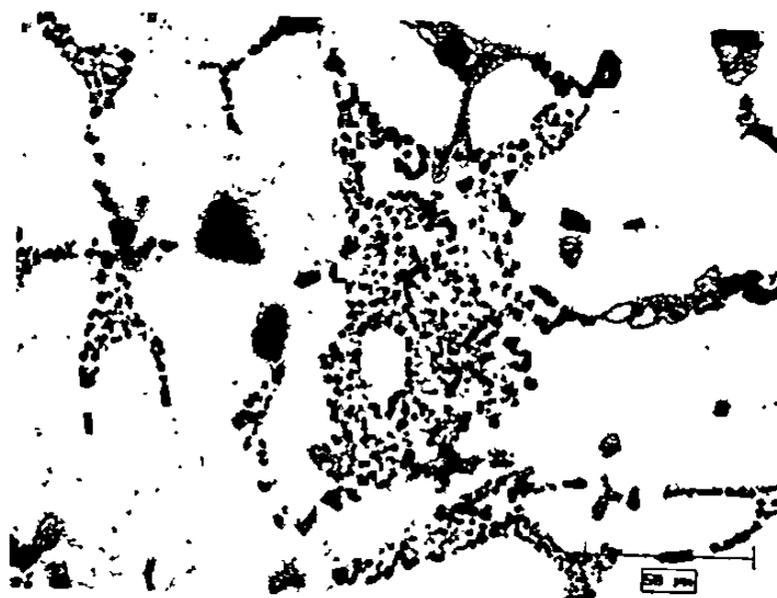


b)

Fig 4.1 Microestructuras en la condición de pulido que muestran las estructuras dendrítica y eutéctica de la aleación modificada. El nivel de modificación observado es entre 4 y 5 a) 200X, b) 500X



a)



b)

Fig. 4.2 Microestructuras en la condición de pulido correspondientes a la aleación modificada y refinada en las cuales se aprecia un nivel de modificación entre 4 y 5, a) 200X, b) 500X

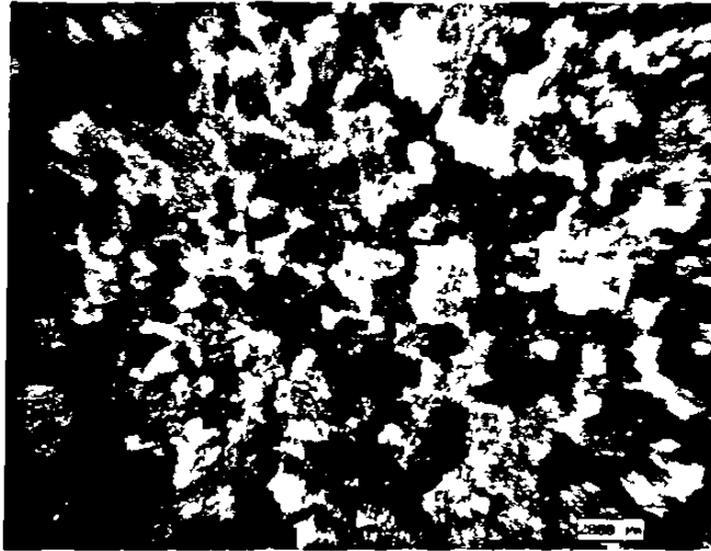


Fig 4.3 Microestructura de la aleación modificada y refinada mostrando un tamaño de grano mediano ($620\mu\text{m}$); Keller, 15X.

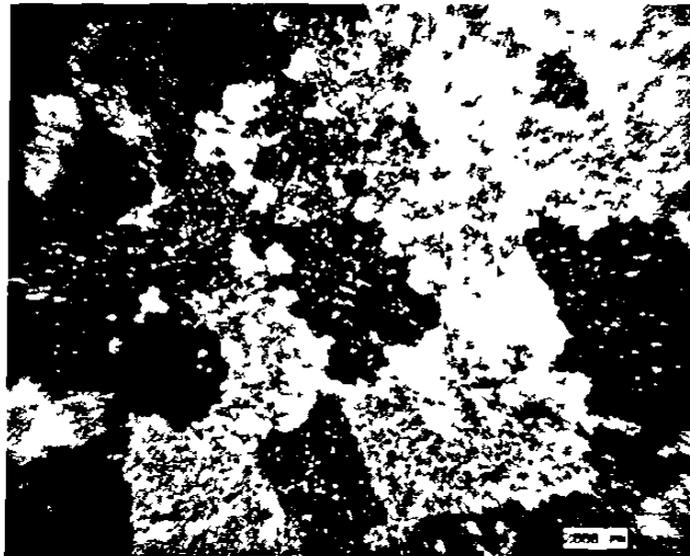


Fig 4.4 Microestructura de la aleación modificada mostrando un tamaño de grano grueso ($1300\mu\text{m}$), Keller, 15X

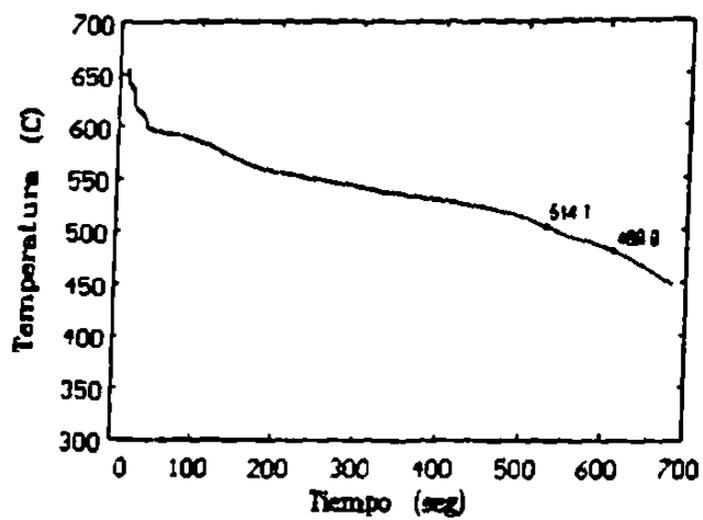
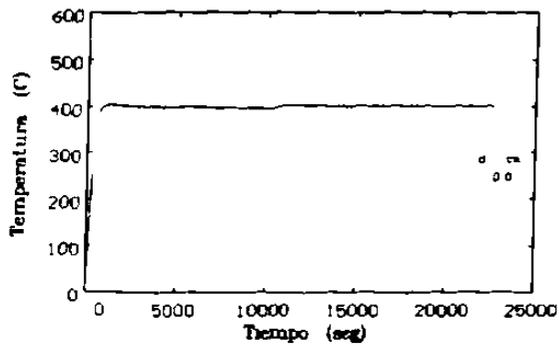
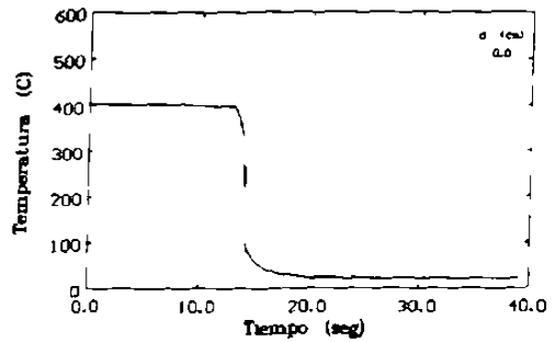


Fig. 4.5 Curva de enfriamiento de una aleación de aluminio tipo 319 que muestra las temperaturas de inicio y fin de la solidificación de una de sus últimas fases [1].

CURVAS DE CALENTAMIENTO DE LA PRUEBA GSA_CD.

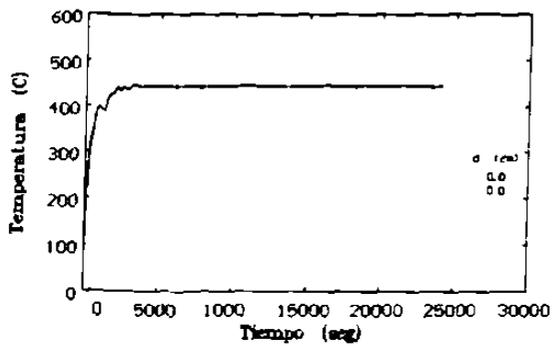


CURVAS DE ENFRIAMIENTO DE LA PRUEBA GSA_CD.

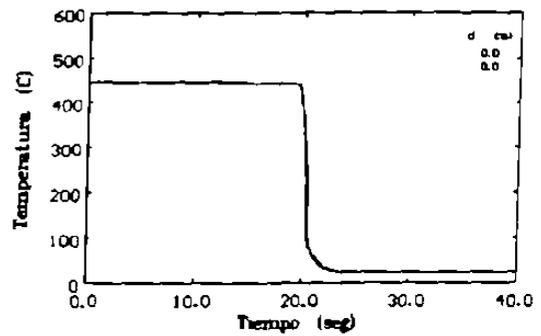


a)

CURVAS DE CALENTAMIENTO DE LA PRUEBA DS_KBCD.

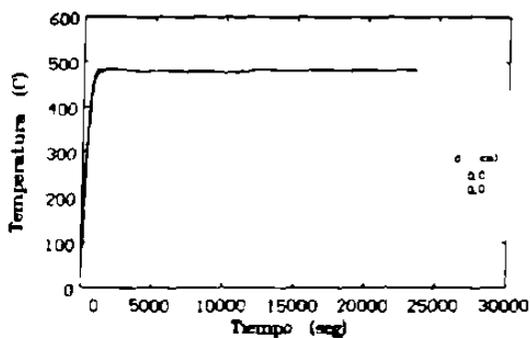


CURVAS DE ENFRIAMIENTO DE LA PRUEBA DS_KBCD.

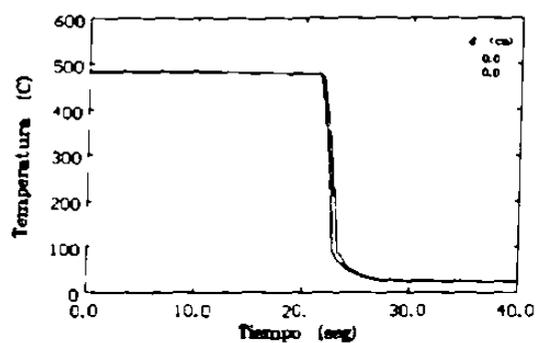


b)

CURVAS DE CALENTAMIENTO DE LA PRUEBA GSC_CD.



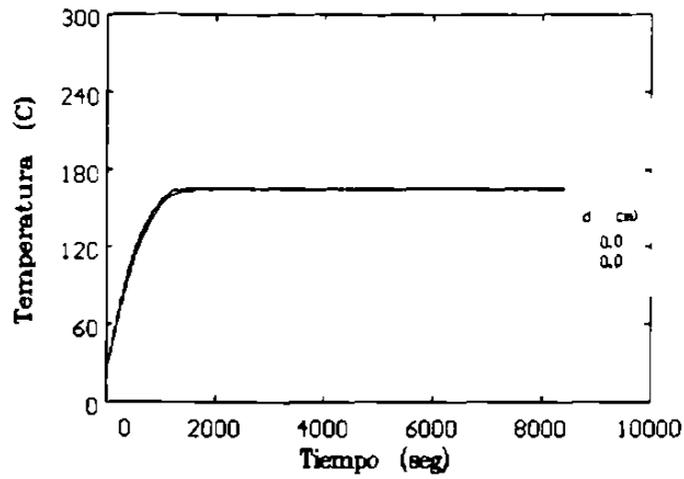
CURVAS DE ENFRIAMIENTO DE LA PRUEBA GSC_CD.



c)

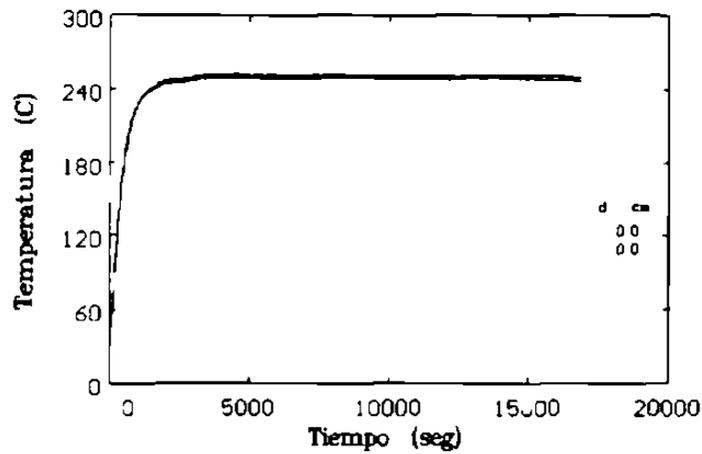
Fig 4 6 Curvas de calentamiento y enfriamiento para los distintos tratamientos térmicos de solubilizado durante 6 hrs , a) 400 °C , b) 440 °C y c) 480 °C

CURVAS DE CALENTAMIENTO DE LA PRUEBA KT6C_CD.



a)

CURVAS DE CALENTAMIENTO DE LA PRUEBA DT7C_CD.



b)

Fig. 4.7 Curvas de calentamiento para los tratamientos térmicos T6 y T7 ;
a) tratamiento de envejecimiento (T6) a 160 °C durante 2 hrs,
b) tratamiento térmico de sobre-envejecido o estabilizado a 250 °C durante 4 hrs

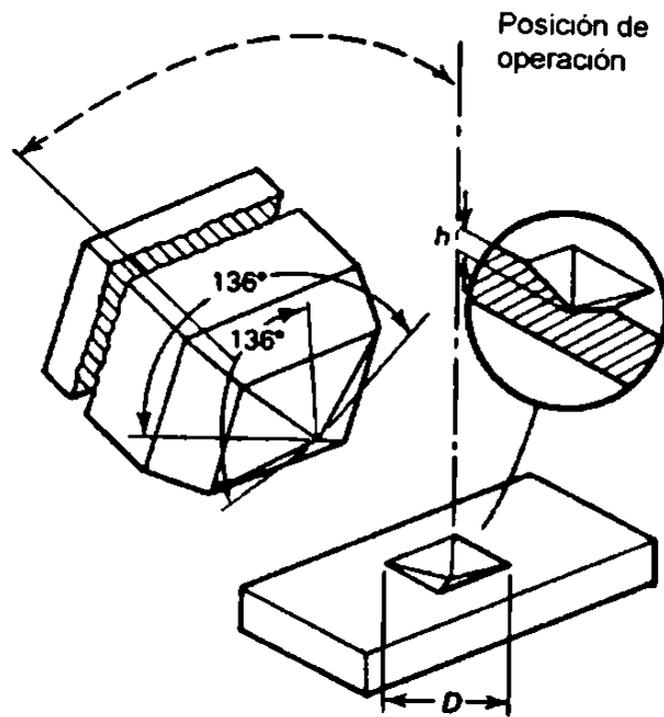
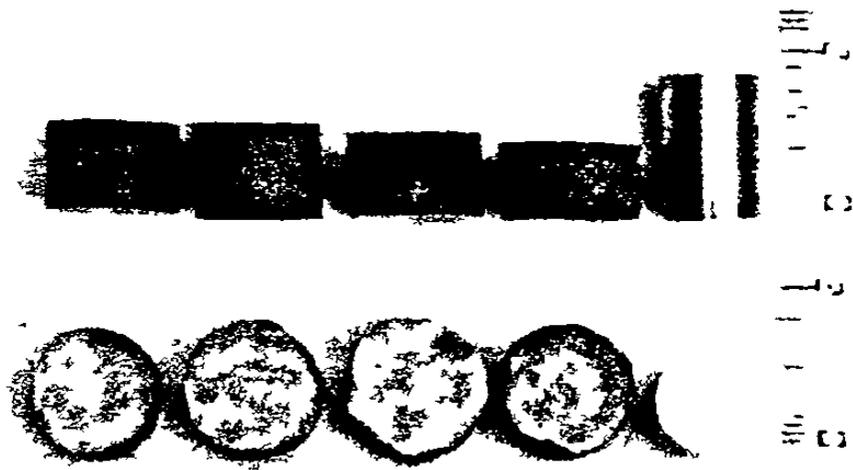
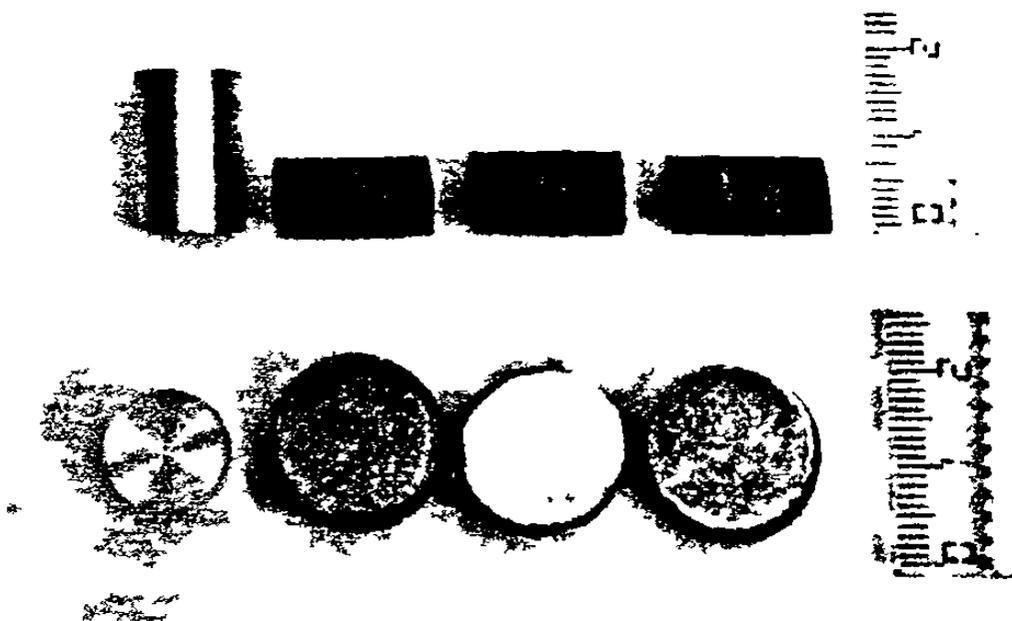


Fig.4.8 Indentador de diamante piramidal para el ensayo Vickers, así como la impresión resultante.



a)



b)

Fig 4.9 Ejemplos de las condiciones que presentaron las muestras después de haber sido sometidas a ensayos de compresión. En cada caso se muestran las vistas longitudinales y diametrales además de una muestra antes del ensayo a) probetas en la condición de solubilizado, b) en condición T7



Fig. 4.10 Muestras sometidas a compresión en la condición T6 mostrando fractura, a la derecha, probeta antes del ensayo.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Introducción

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las pruebas a que fueron sometidas las aleaciones de aluminio bajo estudio. Estas aleaciones corresponden a dos condiciones de estructura, la modificada y refinada (MR) y la únicamente modificada (M).

Se sometieron las muestras a diferentes tratamientos térmicos, después de lo cual se obtuvieron las durezas alcanzadas en las diferentes condiciones; estos valores de dureza se muestran en forma de gráficas de barras para efecto de facilitar la comparación de las mismas.

Posterior a los tratamientos térmicos, se sometieron las muestras a ensayos de compresión; las curvas de fluencia σ , ϵ se muestran en forma comparativa, tanto por temperatura de solubilizado como por condición de tratamiento, especificando en cada caso la velocidad inicial de deformación. De igual forma, las propiedades mecánicas observadas en las curvas de flujo se presentan en forma de gráficos de barras, evidenciando así la variación en el comportamiento debido a las distintas condiciones de prueba y de tratamiento.

Se obtuvieron las curvas de comportamiento del esfuerzo con la velocidad de deformación, así como las gráficas que muestran la variación de la sensibilidad a la velocidad de deformación con la deformación; este análisis se llevó a cabo para los dos tipos de condición de estructura mencionadas al inicio del capítulo.

5.2 Dureza Encontrada en las Diferentes Condiciones de Tratamiento

Las figuras 5.1 y 5.2 muestran los valores de dureza Vickers encontrados en las muestras de aluminio con estructura modificada y refinada (fig. 5.1) y en la aleación modificada (fig. 5.2). Se obtuvieron a partir de una carga de 1kg durante 15 seg sobre las muestras tratadas térmicamente y en condición de pulido.

La identificación de las muestras sobre las gráficas es de la siguiente manera:

M, MR .- tipo de estructura, modificada (M) y modificada y refinada (MR)
S, T6, T7 .-condición de tratamiento, solubilizado (S), tratamiento de
 envejecimiento (T6) y tratamiento de sobre-envejecimiento (T7).

Los cuadros de leyenda a la derecha de las gráficas indican la temperatura a la que se efectuó el tratamiento de solubilizado en las tres condiciones anteriormente mencionadas.

5.3 Gráficas Esfuerzo-Deformación Verdaderos o Curvas de Fluencia

Las figuras 5.3 a 5.5 muestran las curvas de fluencia para la aleación modificada; como se mencionó anteriormente, éstas se presentan en forma comparativa por temperatura de solubilizado; se indica en cada caso la

velocidad inicial de deformación. Este mismo tipo de curvas pero para la aleación de estructura modificada y refinada se muestra en las figuras 5.6 a 5.8.

Las figuras 5.9 a 5.11 comparan el comportamiento en las curvas de fluencia para la aleación modificada en función del tratamiento térmico; lo mismo se presenta en las figuras 5.12 a 5.14 para la aleación modificada y refinada.

En la construcción de estas curvas se consideró un coeficiente de fricción de 0.1 por el contacto entre la superficie de la muestra y la herramienta de compresión, llevando en su interfase película de teflón.

5.4 Resistencia Mecánica

Las gráficas mostradas en las figuras 5.15 a 5.17 para la aleación modificada y en las figuras 5.18 a 5.20 para la estructura modificada y refinada, ilustran la resistencia mecánica evaluada a partir del esfuerzo de cedencia (σ_{ced}), del esfuerzo límite de plasticidad uniforme (σ_{pu}) y del esfuerzo máximo (σ_{max}). Nuevamente se seleccionó el formato de gráficos de barras en las cuales la identificación de las muestras es como sigue:

- M, MR -tipo de estructura
- S, T6, T7 - condición de tratamiento
- A, B, C - Temperatura a la que se efectuó el tratamiento de solubilizado, (A) 400 °C; (B) 440 °C; (C) 480 °C
- 1, 2, 3 - velocidad inicial de deformación en los ensayos de compresión
(1) 0.00046 s⁻¹; (2) 0.0046 s⁻¹; (3) 0.046 s⁻¹.

5.4.1 Esfuerzo Plástico Uniforme (σ_{pu}).

Este esfuerzo límite de plasticidad uniforme del material se obtiene a partir de las curvas de endurecimiento ($d\sigma/d\varepsilon$) y del criterio de Considère ($d\sigma/d\varepsilon = \sigma$). El punto de intersección de estas dos gráficas representa el límite plástico uniforme que el material puede proporcionar.

Para la aleación de estructura modificada, estas gráficas se muestran en las figuras 5.21 a 5.23 y para la estructura modificada y refinada en las figuras 5.24 a 5.26.

5.5 Deformación en el Límite del Esfuerzo Plástico Uniforme

Las figuras 5.27 a 5.32 muestran los valores de la deformación en el límite del esfuerzo plástico uniforme que exhibieron las muestras durante las diversas pruebas y en las diferentes condiciones de tratamiento. Debido a que la mayoría de las muestras no presentaron fractura, las mediciones del porcentaje de aumento de área y porcentaje de reducción de longitud carecen de representatividad, por lo que no se llevaron a efecto.

5.6 Relación entre el Esfuerzo y la Velocidad de Deformación

Este comportamiento se presenta en las figuras 5.33, 5.35 y 5.37 para la aleación modificada y en las figuras 5.39, 5.41 y 5.43 para la aleación modificada y refinada. Cada una de estas gráficas se construyó a partir de los esfuerzos que se presentaron en las diferentes velocidades iniciales de deformación a deformación constante en cada aleación y condición de tratamiento. En el presente estudio se utilizaron tres velocidades iniciales de deformación, es por ello que las curvas muestran tres puntos. La temperatura indicada en las gráficas señala la temperatura a la que se efectuó el tratamiento de solubilizado durante los tratamientos térmicos.

5.7 Sensibilidad a la Velocidad de Deformación (m)

El cambio en la sensibilidad a la velocidad de deformación con respecto a la deformación se muestra en las figuras 5.34, 5.36 y 5.38 para la aleación modificada, y en las figuras 5.40, 5.42 y 5.44 para la aleación modificada y refinada. Al igual que en la sección anterior, estas gráficas constan de tres grupos, cada uno representando el comportamiento para cada temperatura de solubilizado. Como se puede ver, estas gráficas se construyeron para cada condición de tratamiento.

El valor de la sensibilidad a la velocidad de deformación es un indicador de los cambios que ocurren en lo que a la deformación del material se refiere; representa la pendiente de la gráfica $\log \sigma$ contra $\log \dot{\epsilon}$ (ver secciones 2.3.3 y 6.8).

5.8 Exponente de Endurecimiento por Deformación (n) y Coeficiente de Resistencia (K)

La Tabla 5.1 muestra los valores encontrados en estos parámetros para las aleaciones modificada y modificada y refinada; estos valores se obtuvieron para las diferentes condiciones de prueba y de tratamiento.

Algunas gráficas $\log \sigma$ contra $\log \epsilon$ para la obtención de n y K se muestran en las figuras 5.45 y 5.46 ; Si se considera que la curva de endurecimiento sigue la relación $\sigma = K\epsilon^n$, al graficar el esfuerzo contra la deformación en escala logarítmica se obtiene una relación lineal entre $\log \sigma$ y $\log \epsilon$; la pendiente de esta recta en la zona plástica uniforme indica el valor de n , mientras que el valor de K representa el esfuerzo que el material alcanzaría para una deformación $\epsilon=1$.

Tablas

Tabla 5.1 Valores obtenidos del exponente de endurecimiento por deformación (n) y del coeficiente de resistencia (K) para las aleaciones modificada (M) y modificada y refinada (MR) en sus respectivas condiciones de prueba y de tratamiento.

| Muestra | n | K (Mpa) | Muestra | n | K (Mpa) |
|---------|-------|---------|---------|-------|---------|
| MRSA1 | 0.2 | 425 | MSA1 | 0.313 | 577 |
| MRSA2 | 0.16 | 406 | MSA2 | 0.2 | 453 |
| MRSA3 | 0.15 | 380 | MSA3 | 0.17 | 400 |
| MRT6A1 | 0.16 | 433 | MT6A1 | 0.333 | 704 |
| MRT6A2 | 0.15 | 415 | MT6A2 | 0.37 | 781 |
| MRT6A3 | 0.12 | 371 | MT6A3 | 0.36 | 717 |
| MRT7A1 | 0.125 | 335 | MT7A1 | 0.135 | 348 |
| MRT7A2 | 0.1 | 314 | MT7A2 | 0.126 | 352 |
| MRT7A3 | 0.13 | 311 | MT7A3 | 0.156 | 327 |
| MRSB1 | 0.27 | 756 | MSB1 | 0.35 | 692 |
| MRSB2 | 0.314 | 786 | MSB2 | 0.4 | 847 |
| MRSB3 | 0.3 | 726 | MSB3 | 0.205 | 403 |
| MRT6B1 | 0.202 | 610 | MT6B1 | 0.225 | 797 |
| MRT6B2 | 0.2 | 665 | MT6B2 | 0.2 | 741 |
| MRT6B3 | 0.12 | 468 | MT6B3 | 0.204 | 674 |
| MRT7B1 | 0.13 | 346 | MT7B1 | 0.312 | 721 |
| MRT7B2 | 0.1 | 330 | MT7B2 | 0.34 | 721 |
| MRT7B3 | 0.14 | 435 | MT7B3 | 0.27 | 522 |
| MRSC1 | 0.275 | 824 | MSC1 | 0.4 | 866 |
| MRSC2 | 0.38 | 791 | MSC2 | 0.33 | 640 |
| MRSC3 | 0.37 | 800 | MSC3 | 0.386 | 736 |
| MRT6C1 | 0.247 | 838 | MT6C1 | 0.225 | 789 |
| MRT6C2 | 0.203 | 752 | MT6C2 | 0.213 | 734 |
| MRT6C3 | 0.2 | 720 | MT6C3 | 0.2 | 700 |
| MRT7C1 | 0.19 | 578 | MT7C1 | 0.353 | 877 |
| MRT7C2 | 0.188 | 564 | MT7C2 | 0.37 | 963 |
| MRT7C3 | 0.16 | 497 | MT7C3 | 0.44 | 1236 |

Figuras

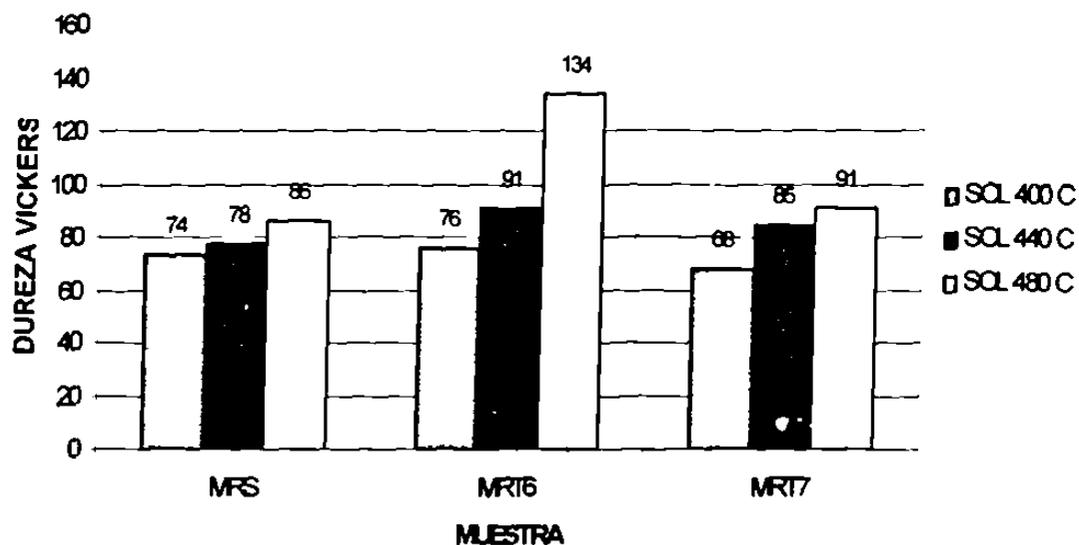


Fig. 5.1 Valores de dureza Vickers (1Kg./15 seg) encontrados en las distintas condiciones de tratamiento para la muestra modificada y refinada, a la derecha se muestran las temperaturas de solubilizado.

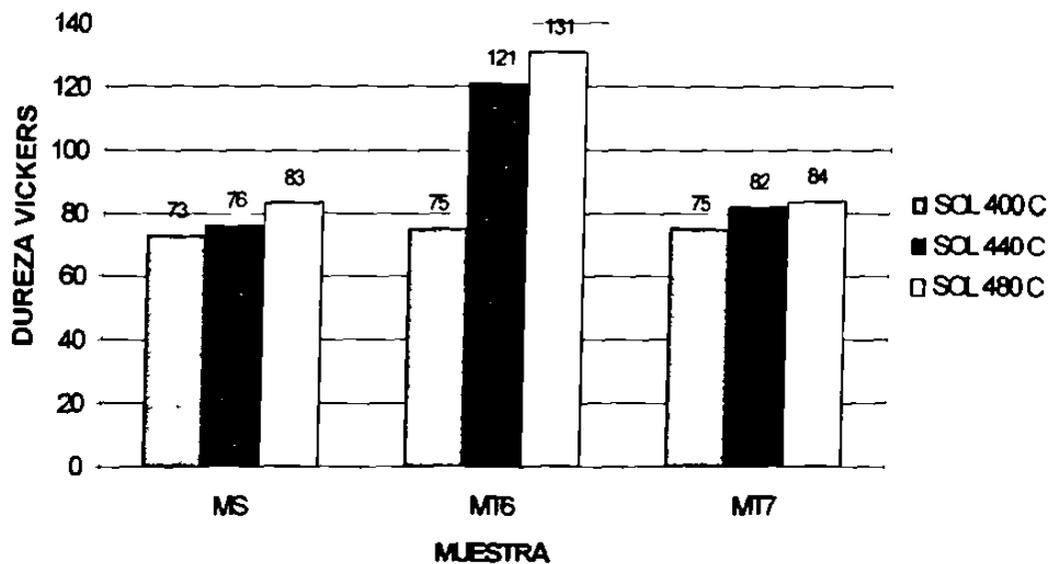


Fig 5.2 Valores de dureza Vickers (1Kg /15 seg) encontrados en las distintas condiciones de tratamiento para la muestra modificada, a la derecha se muestran las temperaturas de solubilizado

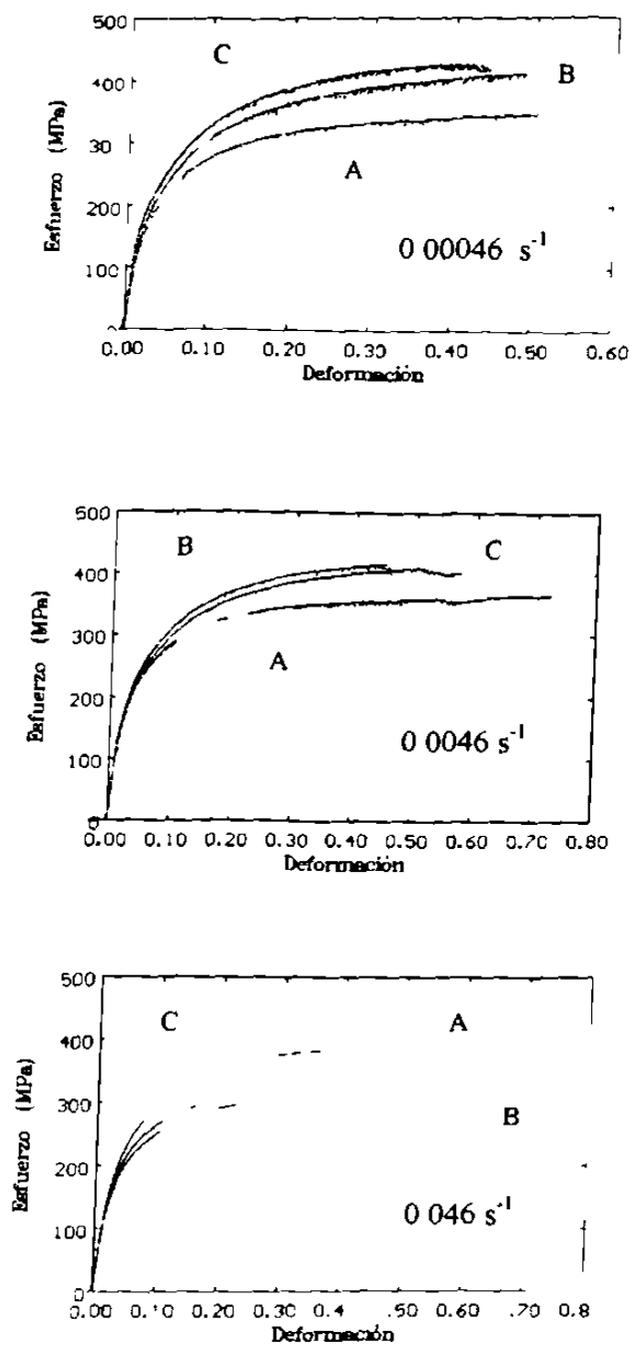


Fig. 5.3 Curvas de fluencia a diferente velocidad inicial de deformación para la aleación modificada en condición de solubilizado. Este tratamiento se realizó a tres temperaturas: 400 °C (A), 440°C (B) y 480°C (C).

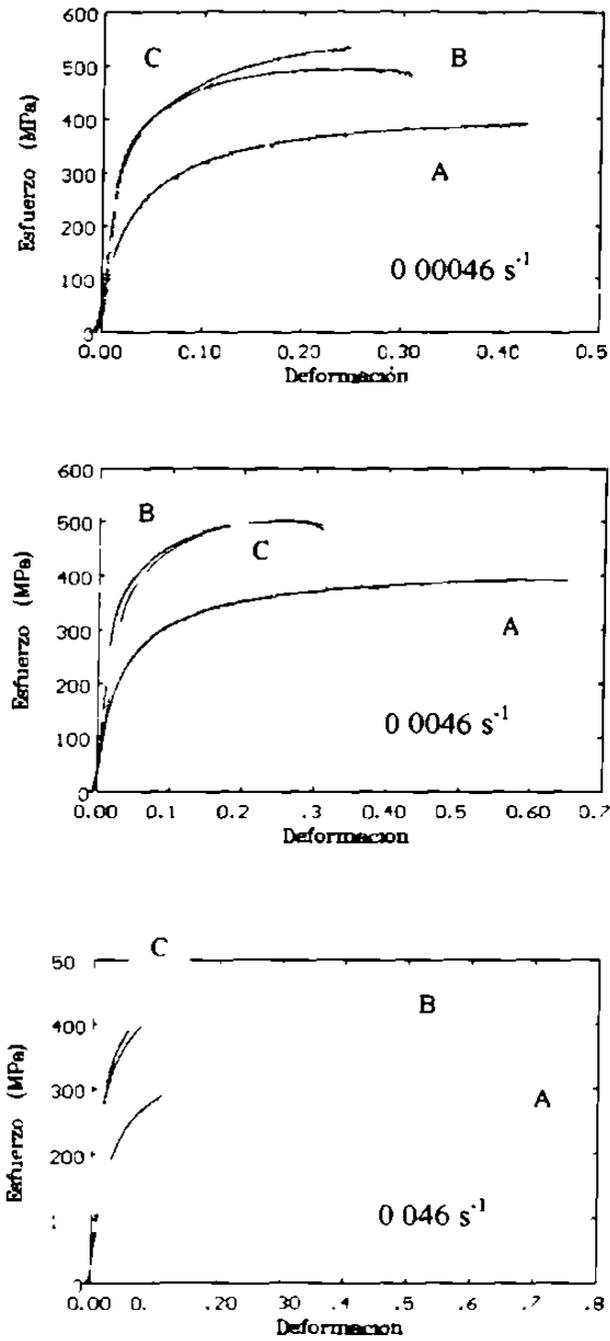


Fig 5 4 Curvas de fluencia a diferente velocidad de deformación inicial para la aleación modificada en condición T6 con temperaturas de solubilizado a 400 °C (A), 440 °C (B) y 480 °C (C)

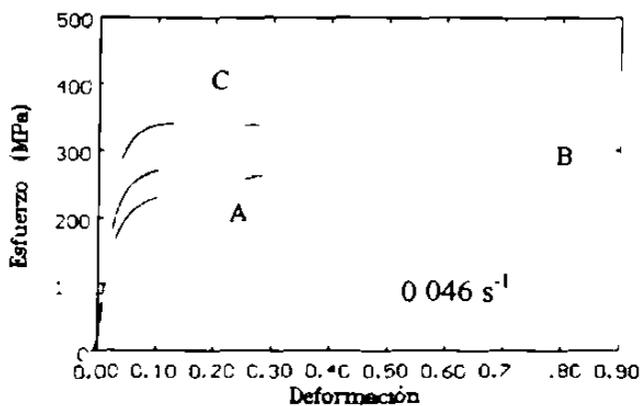
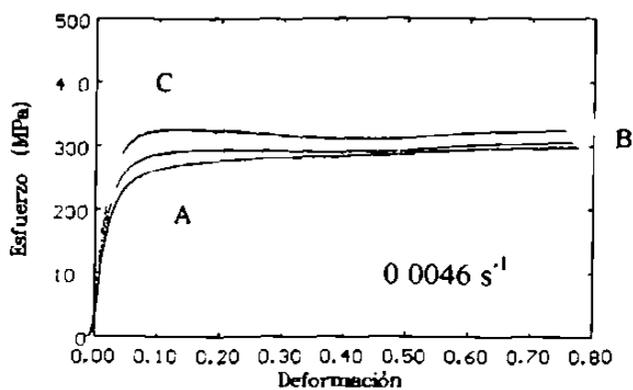
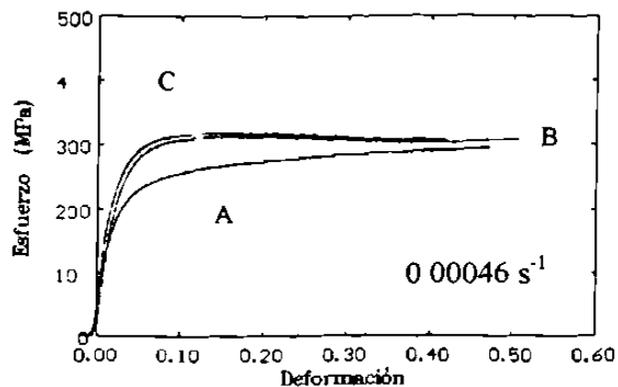


Fig 5.5 Curvas de fluencia a diferente velocidad de deformación inicial para la aleación modificada en condición T7 con temperaturas de solubilizado a 400 °C (A), 440 °C (B) y 480 °C (C).

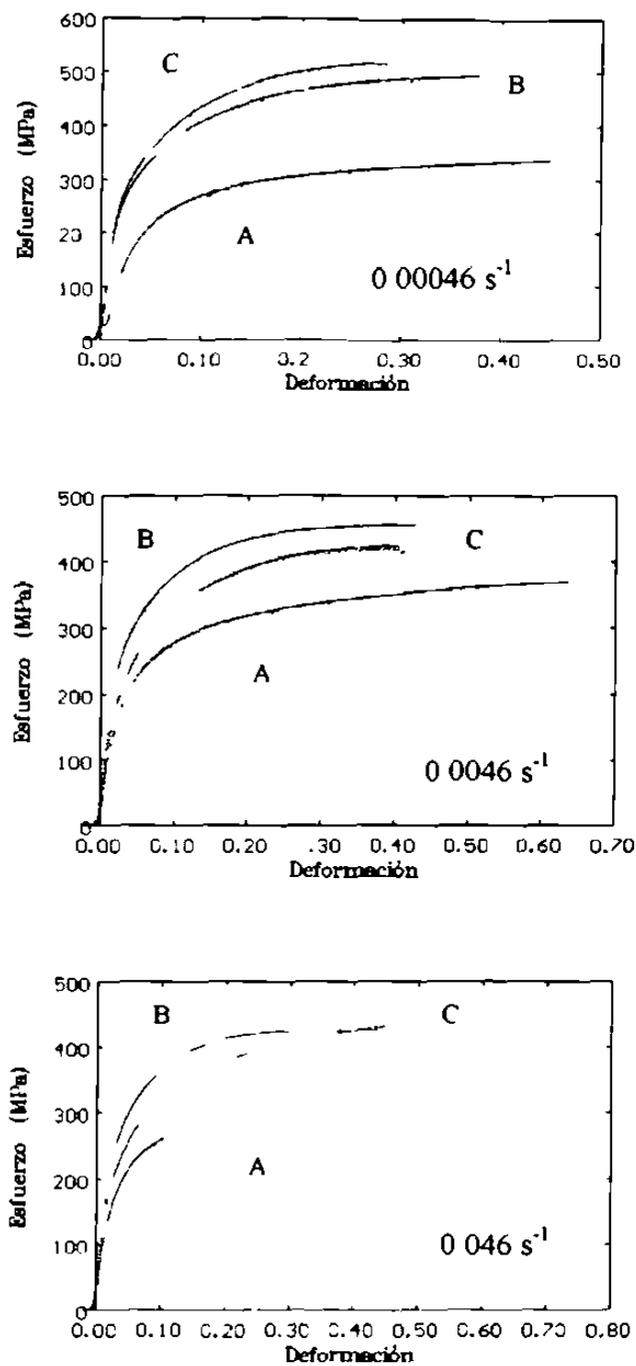


Fig 5.6 Curvas de fluencia a diferente velocidad inicial de deformación para la aleación modificada y refinada en condición de solubilizado. Este tratamiento se realizó a tres temperaturas. A, 400°C, B, 440 °C y C 480 °C.

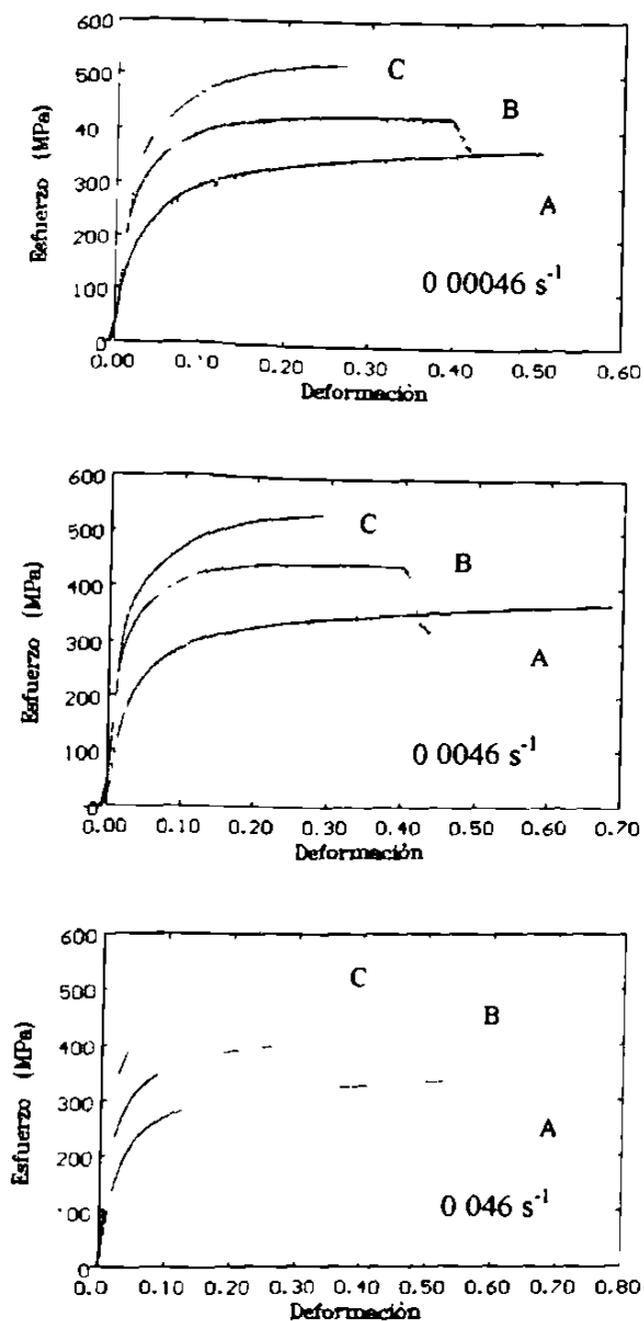


Fig 5.7 Curvas de fluencia a diferente velocidad inicial de deformación para la aleación modificada y refinada en condición T6. Las muestras fueron solubilizadas a tres temperaturas. A 400 °C, B, 440 °C y C 480 °C

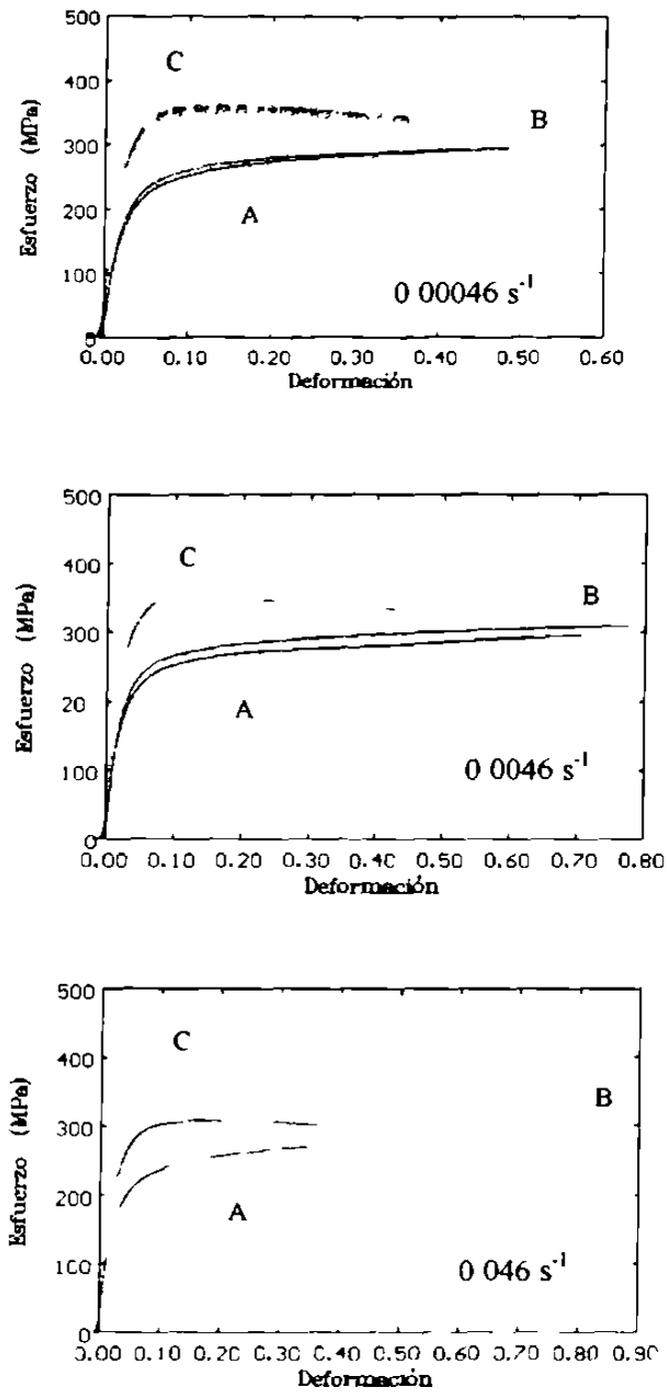


Fig 5.8 Curvas de fluencia a diferente velocidad inicial de deformación para la aleación modificada y refinada en condición T7. Las muestras fueron solubilizadas a tres temperaturas A, 400 °C, B, 440 °C y C 480 °C

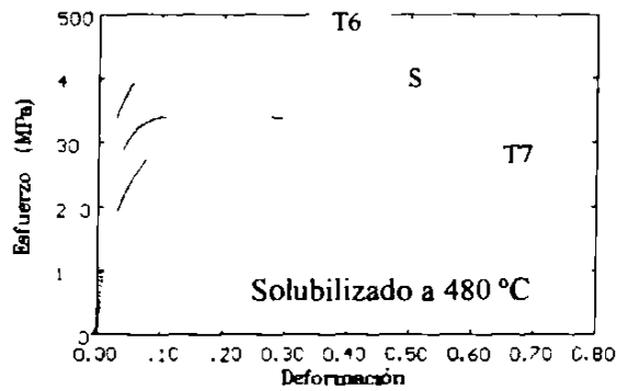
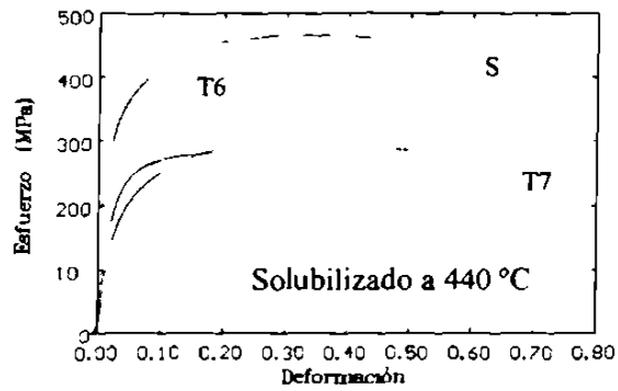
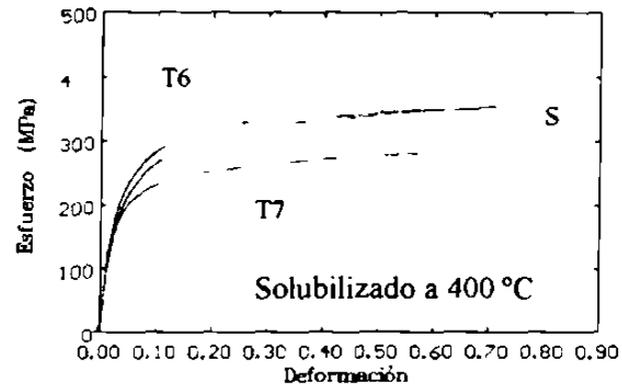


Fig 5.9 Curvas de fluencia para la aleación modificada en sus diferentes tratamientos y temperaturas de solubilizado. En todos los casos la velocidad inicial de deformación fue de 0.046 s^{-1} .

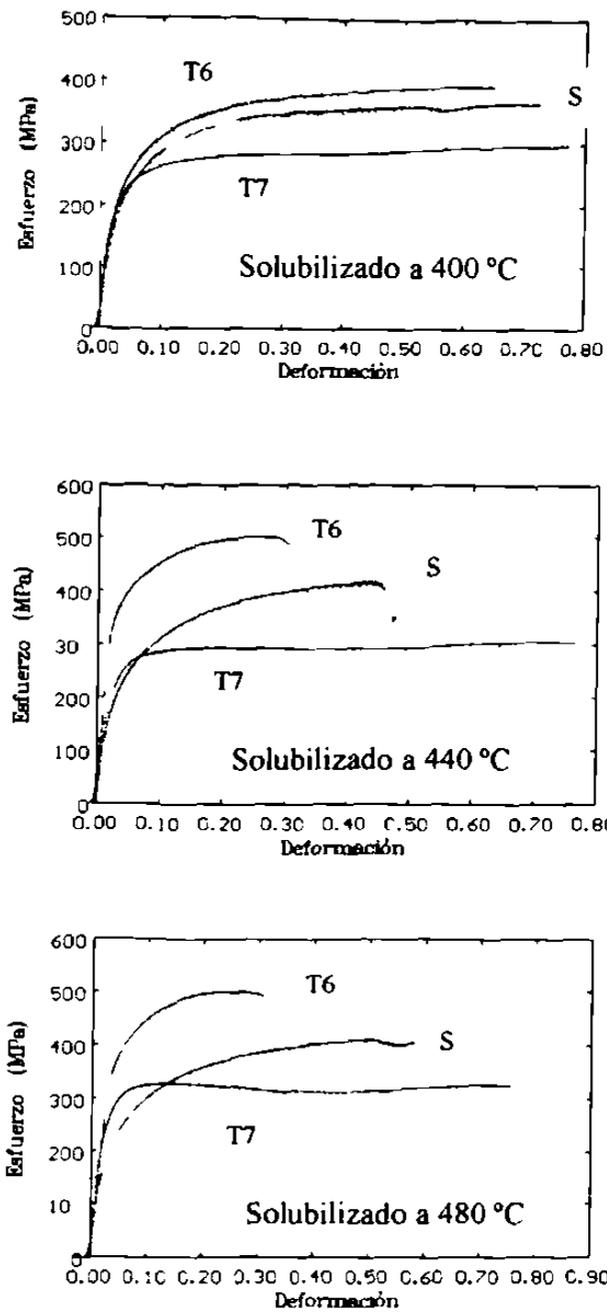


Fig 5 10 Curvas de fluencia para la aleación modificada en sus diferentes tratamientos y temperaturas de solubilizado. En todos los casos la velocidad inicial de deformación fue de 0.0046 s^{-1}

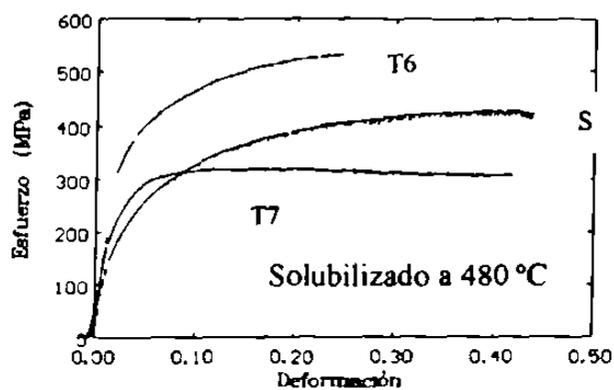
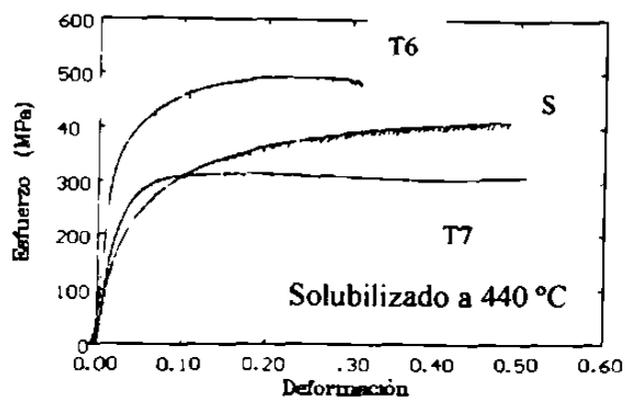
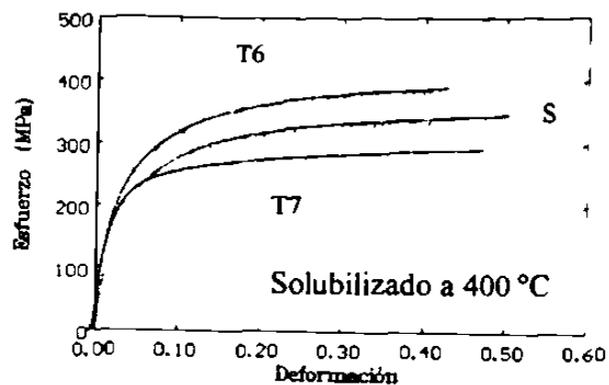


Fig 5.11 Curvas de fluencia para la aleación modificada en sus diferentes tratamientos y temperaturas de solubilizado. En todos los casos la velocidad inicial de deformación fue de 0.00046 s^{-1}

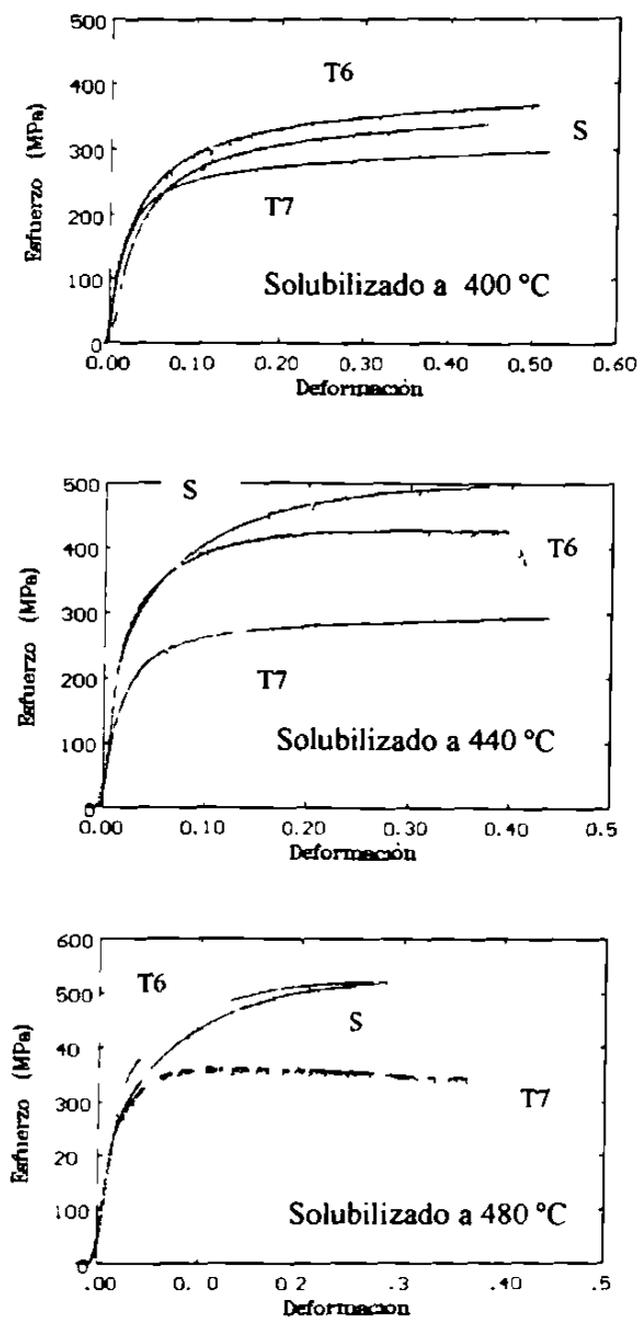


Fig. 5 12 Curvas de fluencia para la aleación modificada y refinada en sus diferentes tratamientos y temperaturas de solubilizado. En todos los casos la velocidad inicial de deformación fue de 0.00046 s^{-1} .

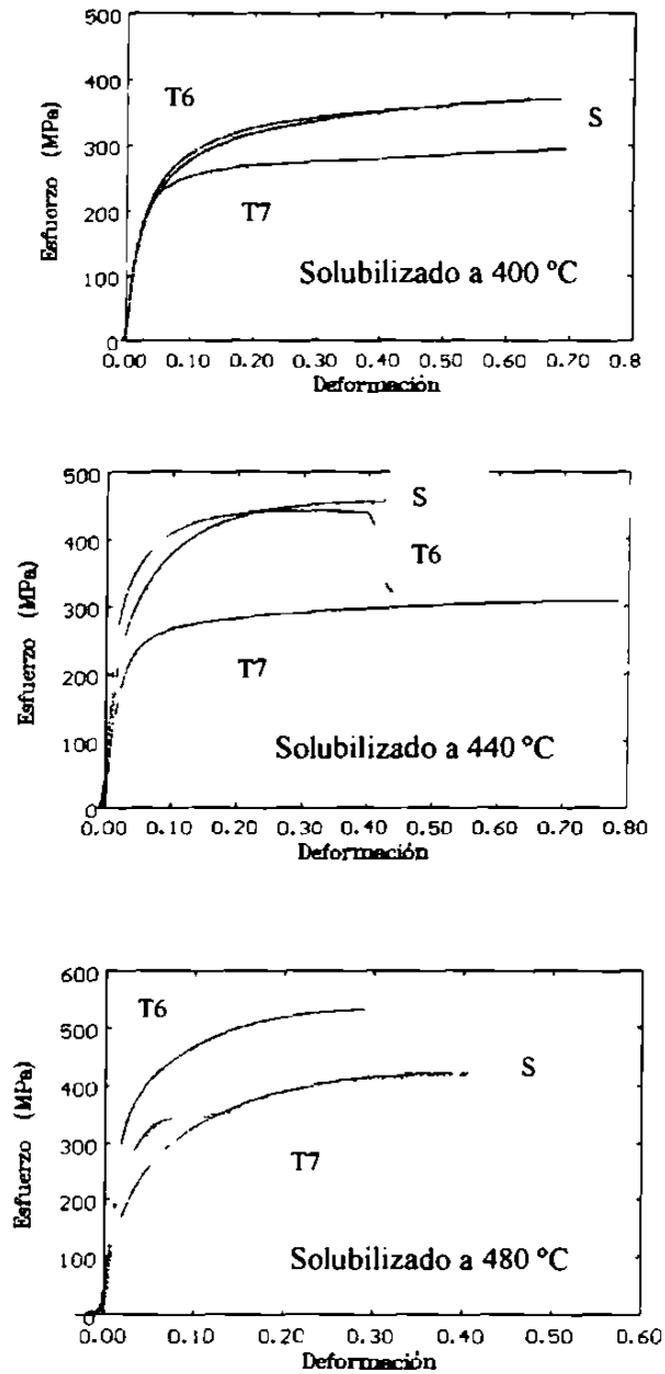


Fig. 5.13 Curvas de fluencia para la aleación modificada y refinada en sus diferentes tratamientos y temperaturas de solubilizado. En todos los casos la velocidad inicial de deformación fue de 0.0046 s^{-1}

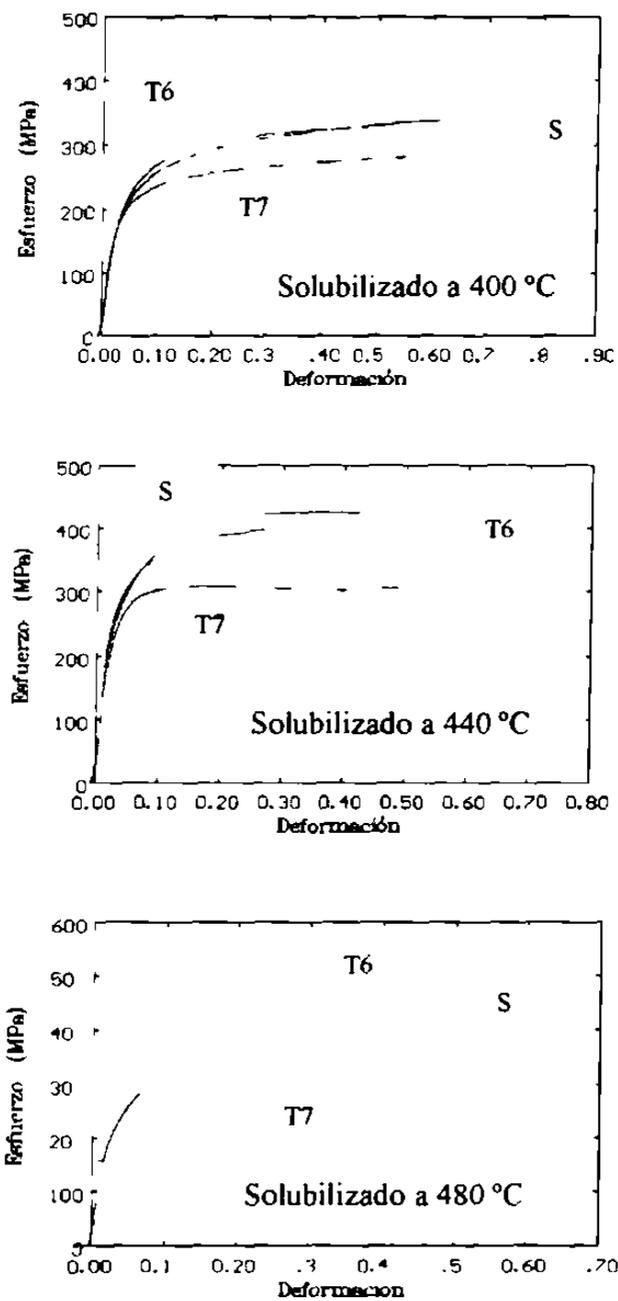


Fig 5 14 Curvas de fluencia para la aleación modificada y refinada en sus diferentes tratamientos y temperaturas de solubilizado. En todos los casos la velocidad inicial de deformación fue de 0.046 s^{-1} .

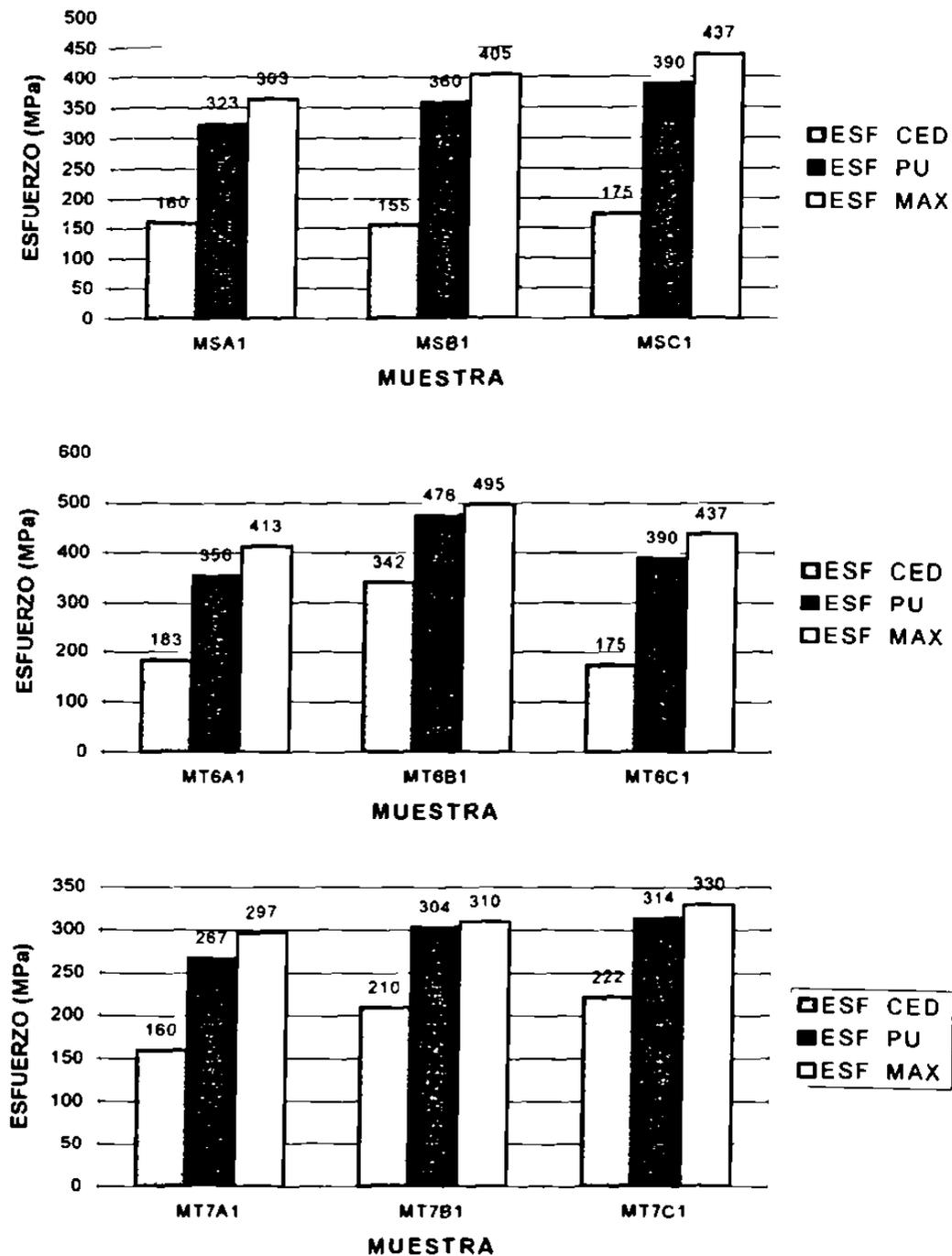


Fig 5.15 Resistencia mecánica encontrada en la aleación modificada para los diferentes tratamientos y temperaturas de solubilizado. En todos los casos la velocidad de deformación inicial en las muestras fue de $0.00046s^{-1}$

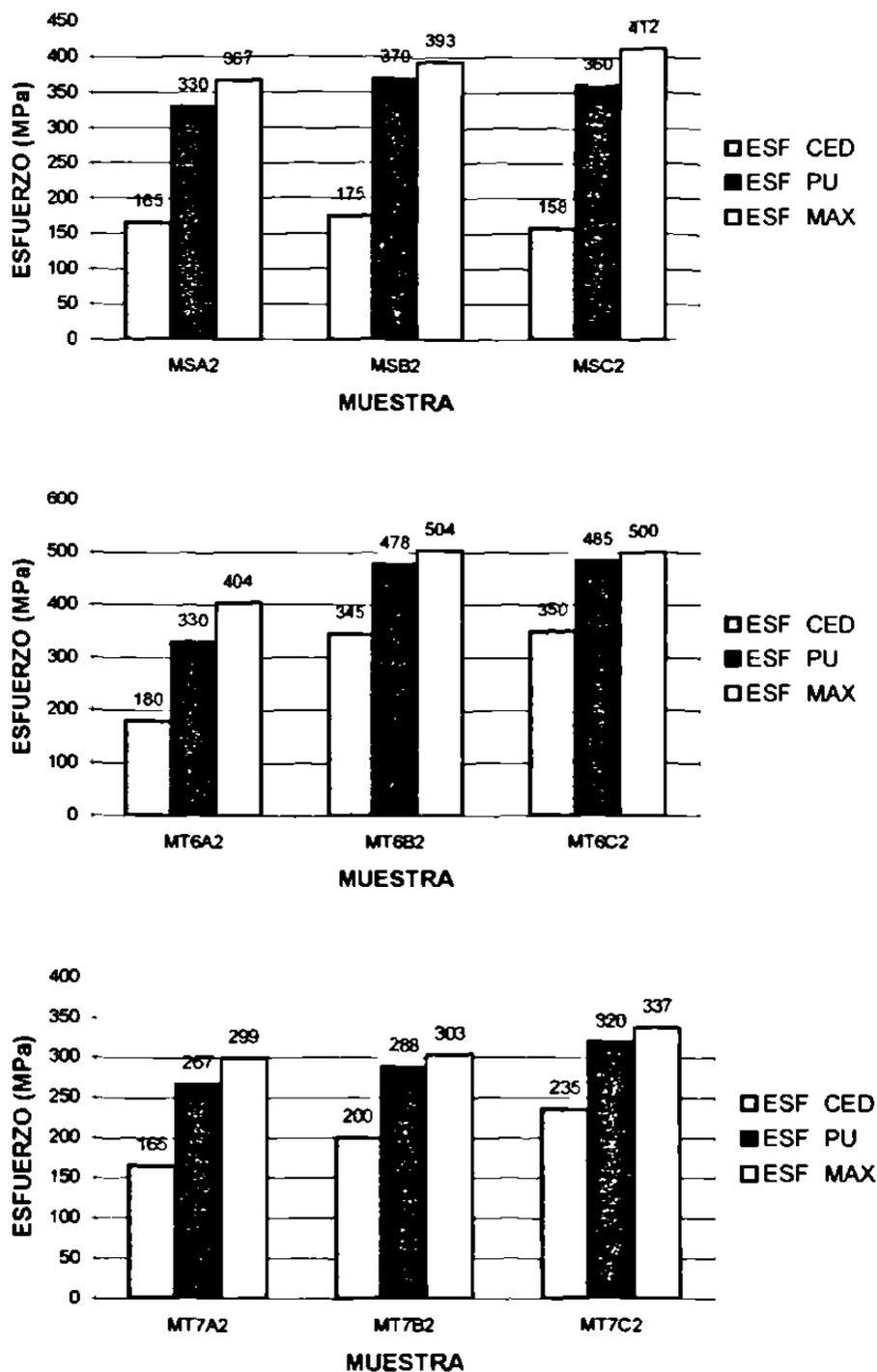


Fig 5.16 Resistencia mecánica encontrada en la aleación modificada para los diferentes tratamientos y temperaturas de solubilizado. En todos los casos la velocidad inicial de deformación fue de 0.0046 s^{-1}

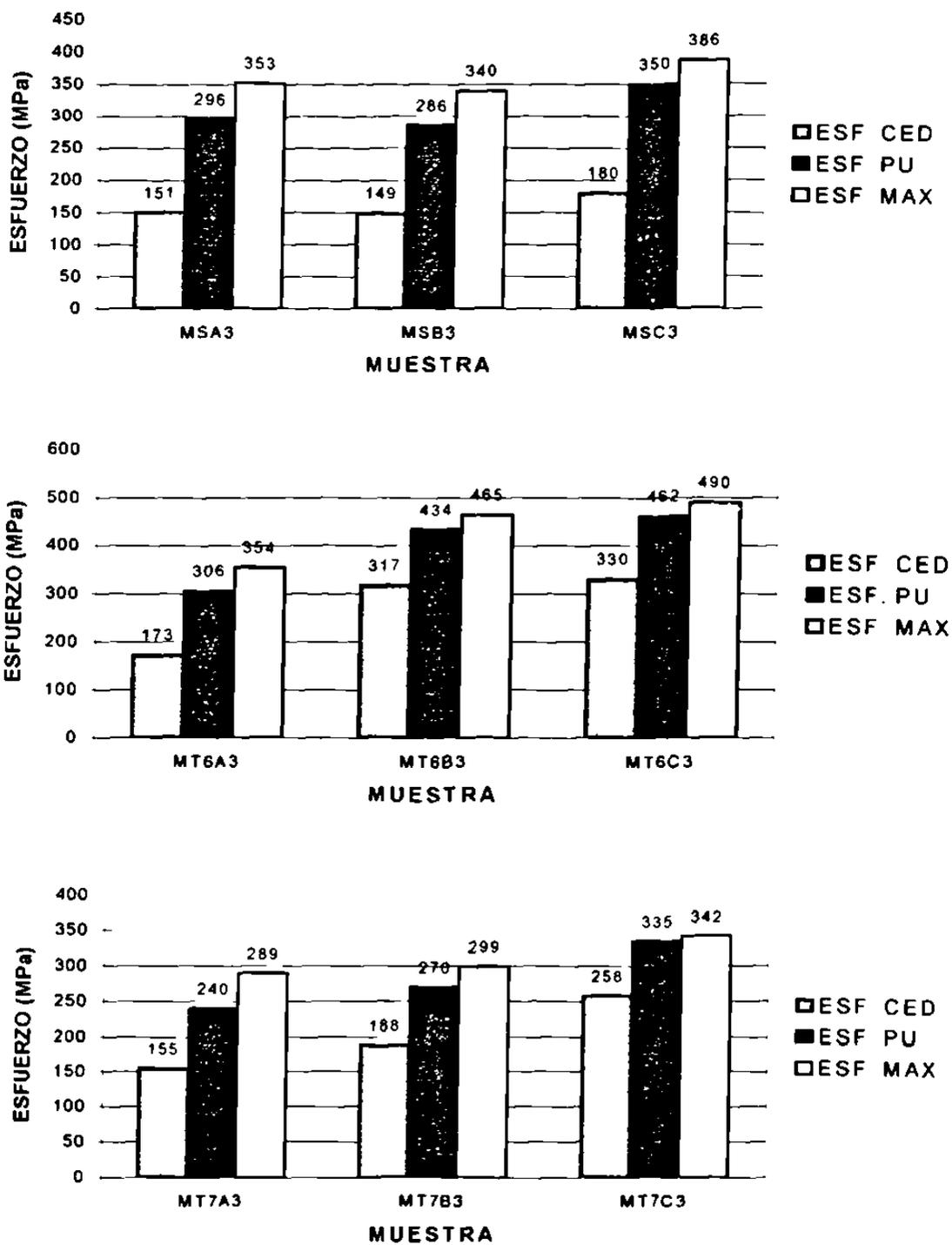


Fig 5.17 Resistencia mecánica encontrada en la aleación modificada para los diferentes tratamientos y temperaturas de solubilizado. En todos los casos la velocidad inicial de deformación fue de 0.046 s^{-1}

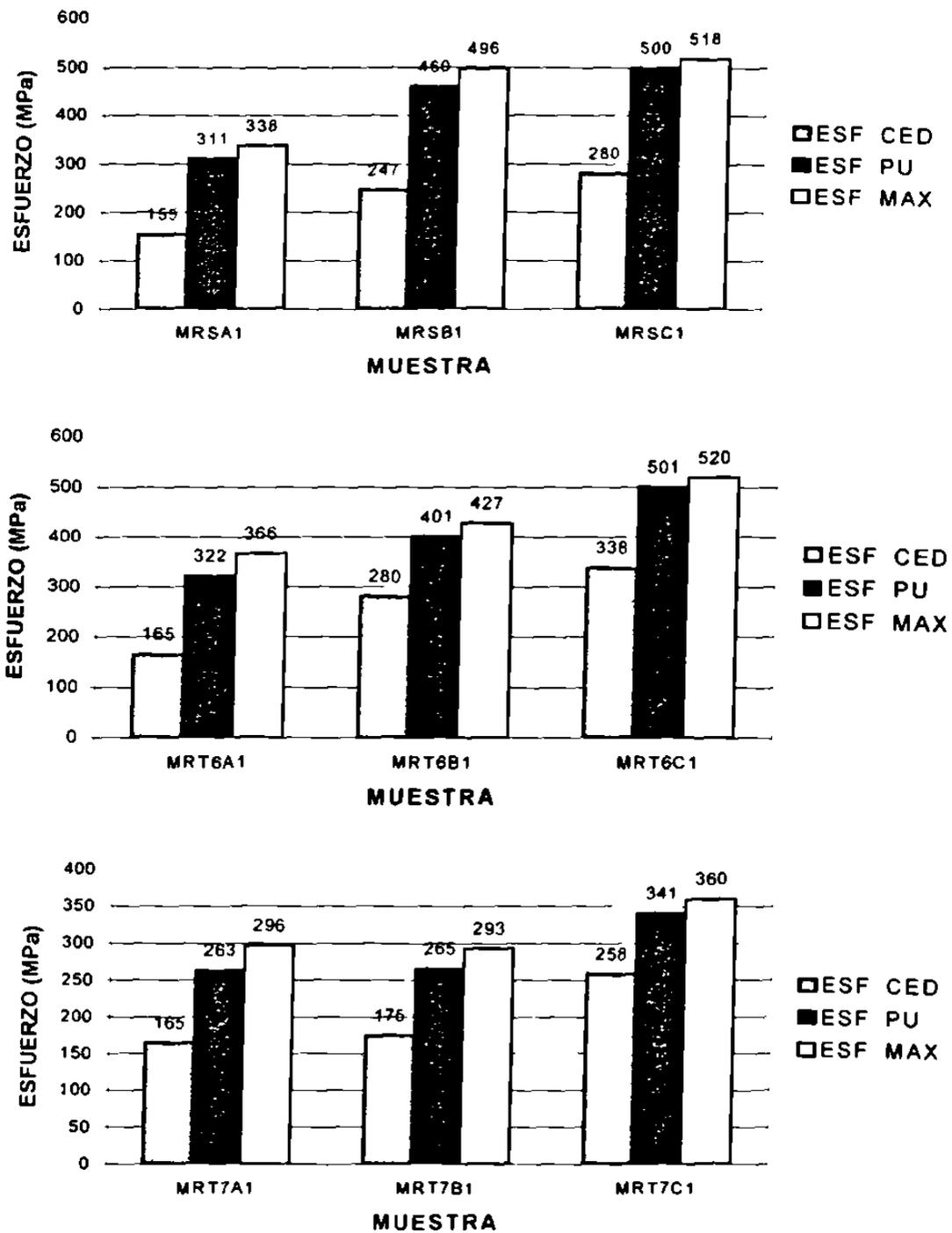


Fig. 5.18 Resistencia mecánica encontrada en la aleación modificada y refinada para los diferentes tratamientos y temperaturas de solubilizado. En todos los casos la velocidad de deformación inicial en la muestra fue de 0.00046 s^{-1} .

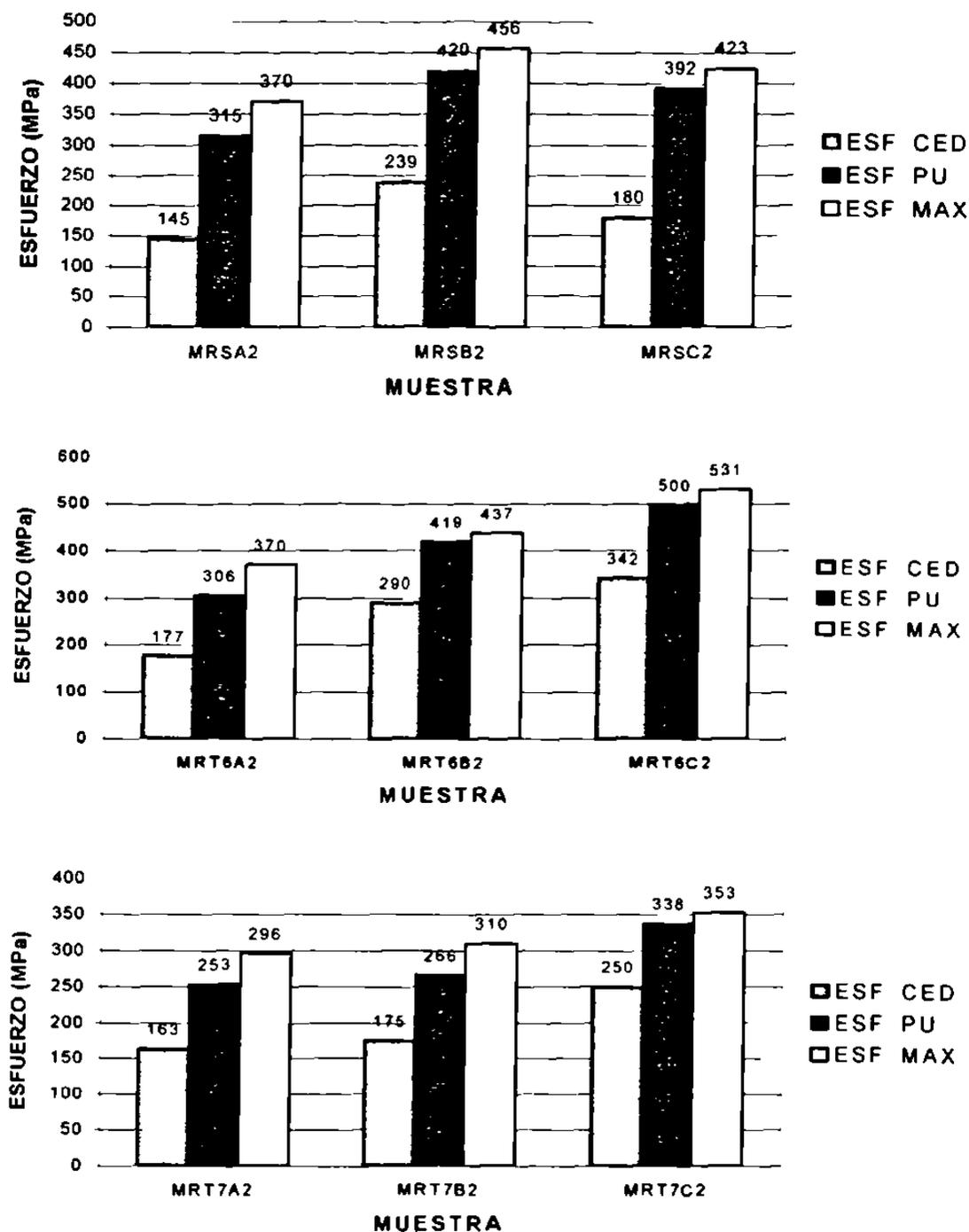


Fig 5 19 Resistencia mecánica encontrada en la aleación modificada y refinada para los diferentes tratamientos y temperaturas de solubilizado. En todos los casos la velocidad inicial de deformación fue de 0.0046 s^{-1}

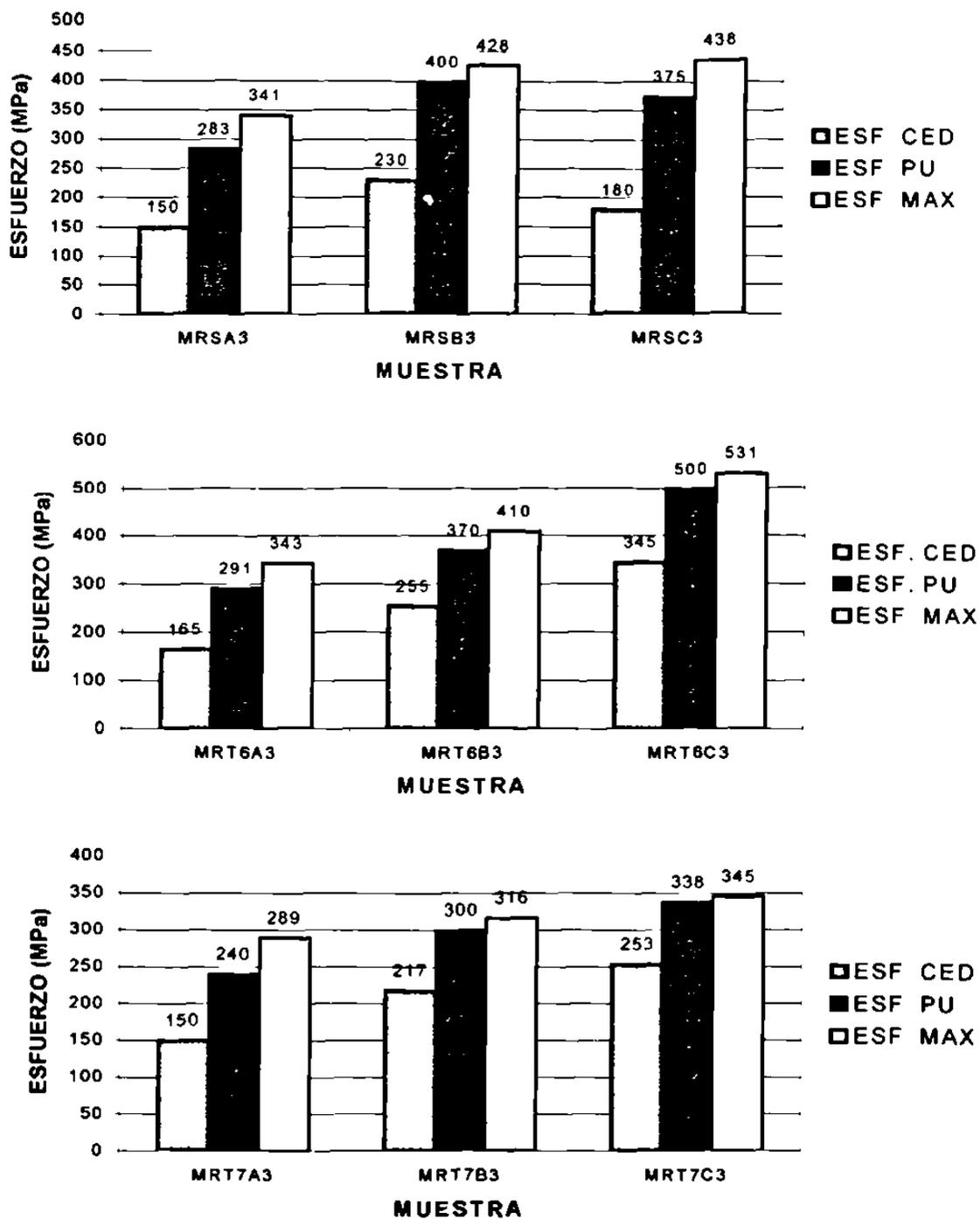


Fig. 5 20 Resistencia mecánica encontrada en la aleación modificada y refinada para los diferentes tratamientos y temperaturas de solubilizado. En todos los casos la velocidad inicial de deformación en las muestras fue de 0.046 s^{-1}

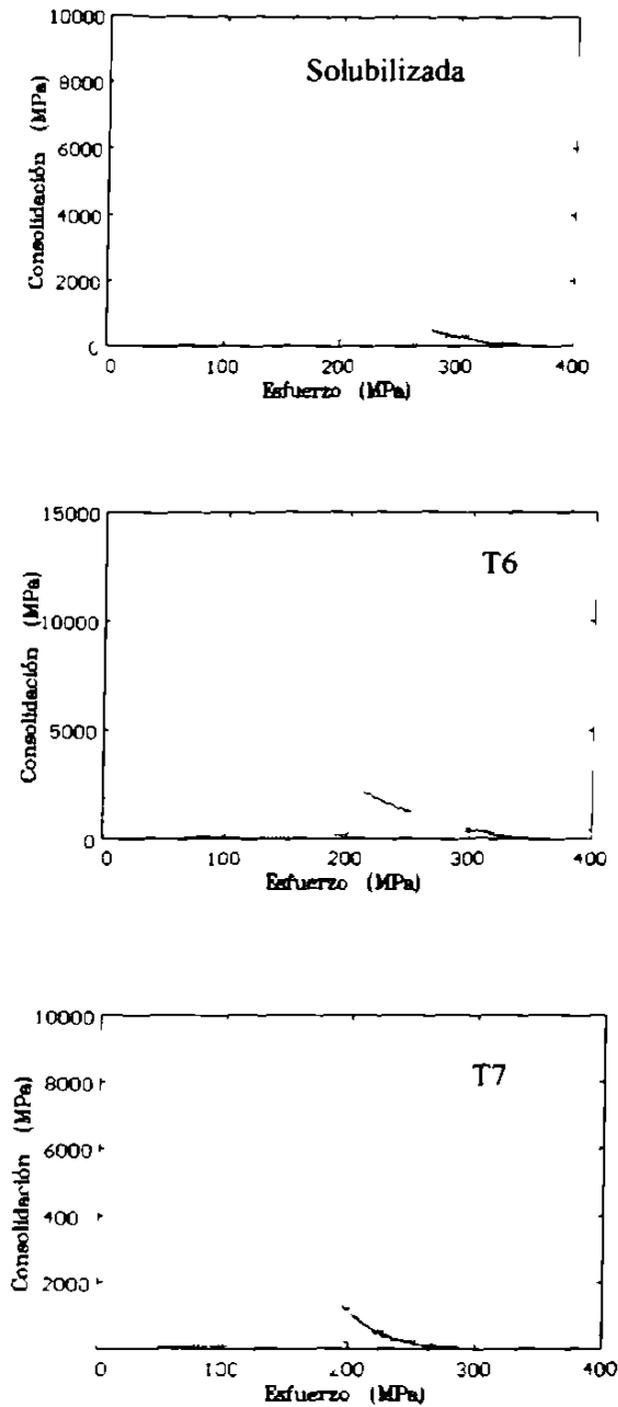


Fig 5.21 Curvas de endurecimiento por deformación y criterio de Considere para la aleación modificada y con tratamiento de solubilizado a 400 °C En cada caso se muestra la condición de tratamiento, los ensayos se realizaron a una velocidad inicial de deformación de 0.046 s⁻¹

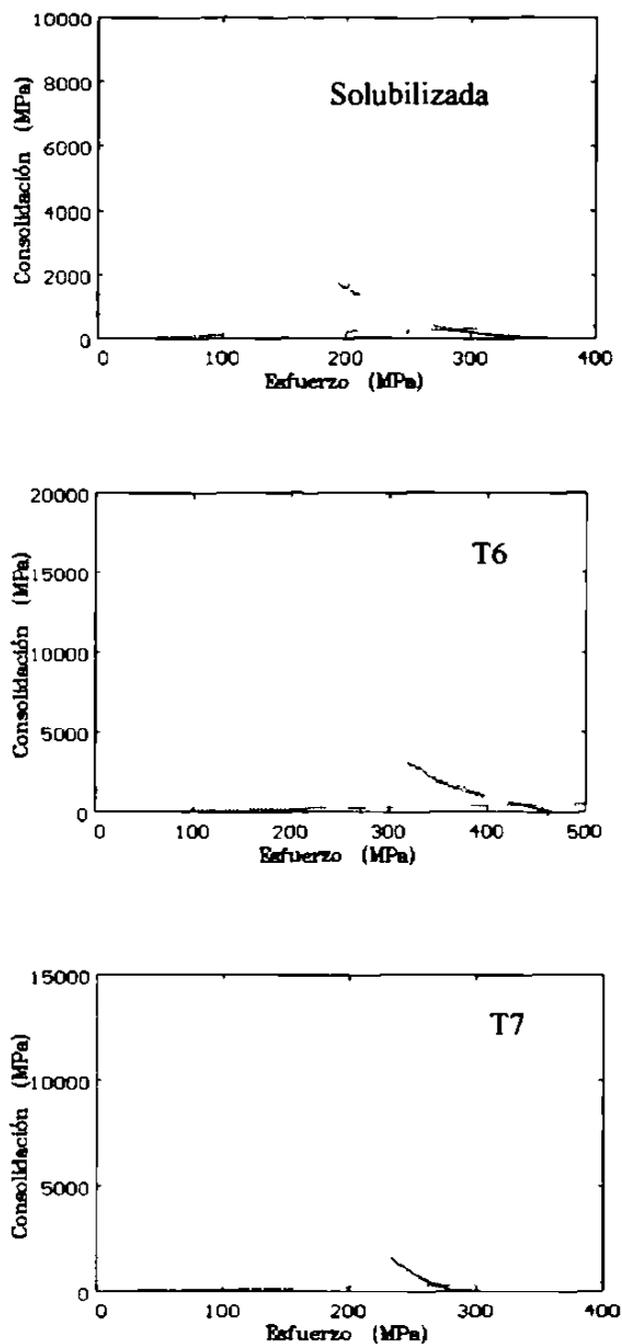


Fig. 5.22 Curvas de endurecimiento por deformación y criterio de Considère para la aleación modificada y con tratamiento de solubilizado a 440 °C En cada caso se muestra la condición de tratamiento; los ensayos se realizaron a una velocidad inicial de deformación de 0.046 s^{-1} .

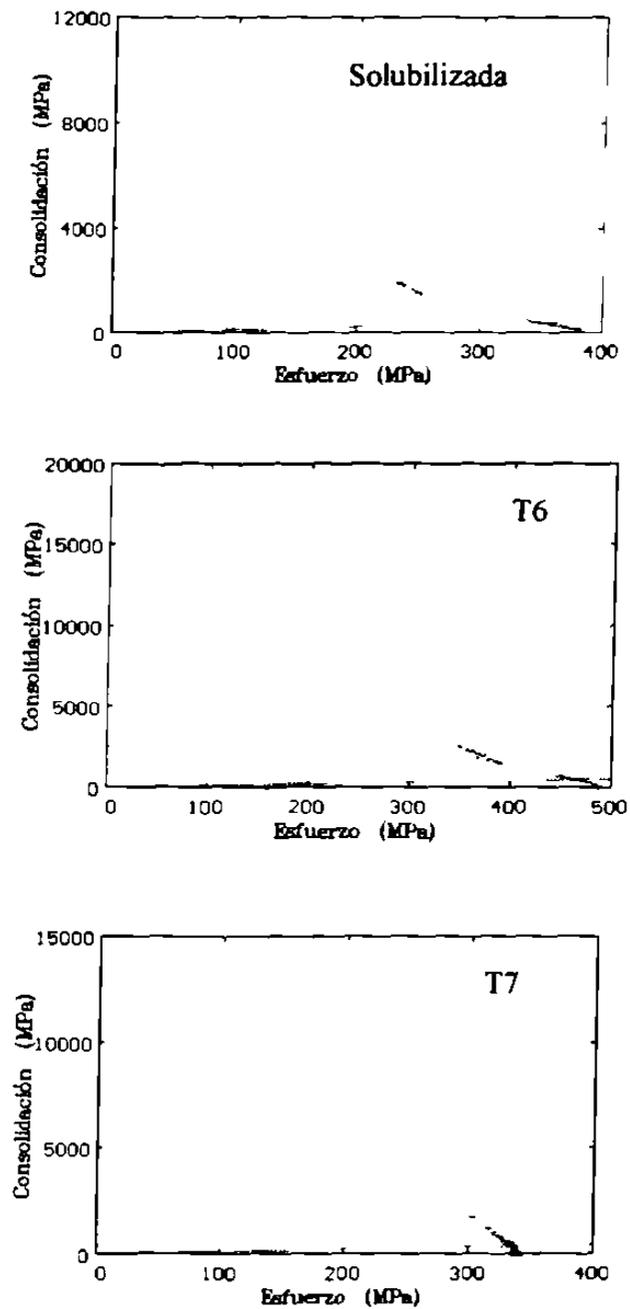


Fig. 5.23 Curvas de endurecimiento por deformación y criterio de Considère para la aleación modificada y con tratamiento de solubilizado a 480 °C. En cada caso se muestra la condición de tratamiento, los ensayos se realizaron a una velocidad inicial de deformación de 0.046 s^{-1} .

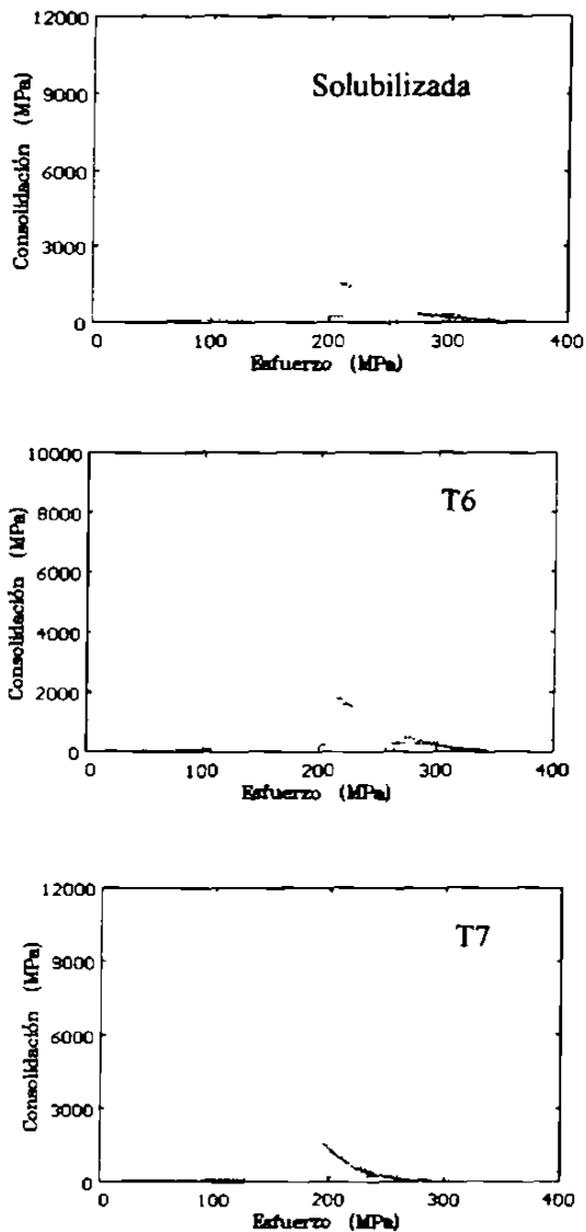


Fig. 5.24 Curvas de endurecimiento por deformación y critero de Considère para la aleación modificada y refinada con tratamiento de solubilizado a 400 °C. En cada caso se indica la condición de tratamiento; los ensayos se realizaron a una velocidad inicial de deformación de 0.046 s^{-1} .

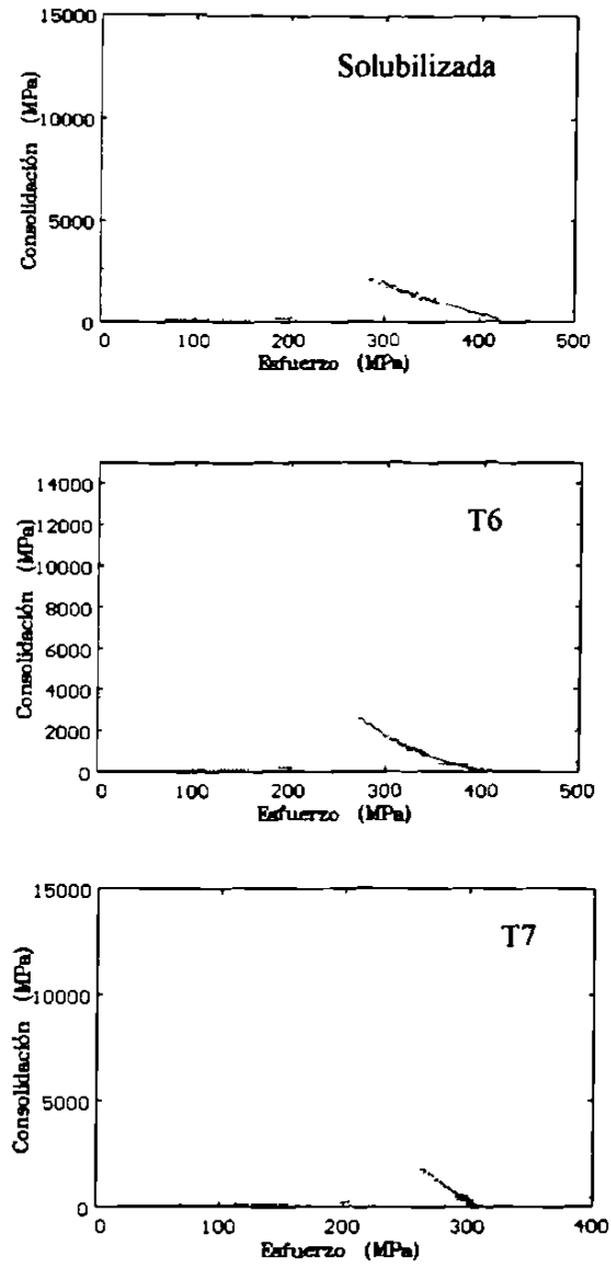


Fig. 5.25 Curvas de endurecimiento por deformación y criterio de Considère para la aleación modificada y refinada con tratamiento de solubilizado a 440 °C. En cada caso se indica la condición de tratamiento, los ensayos se realizaron a una velocidad inicial de deformación de 0.046 s⁻¹.

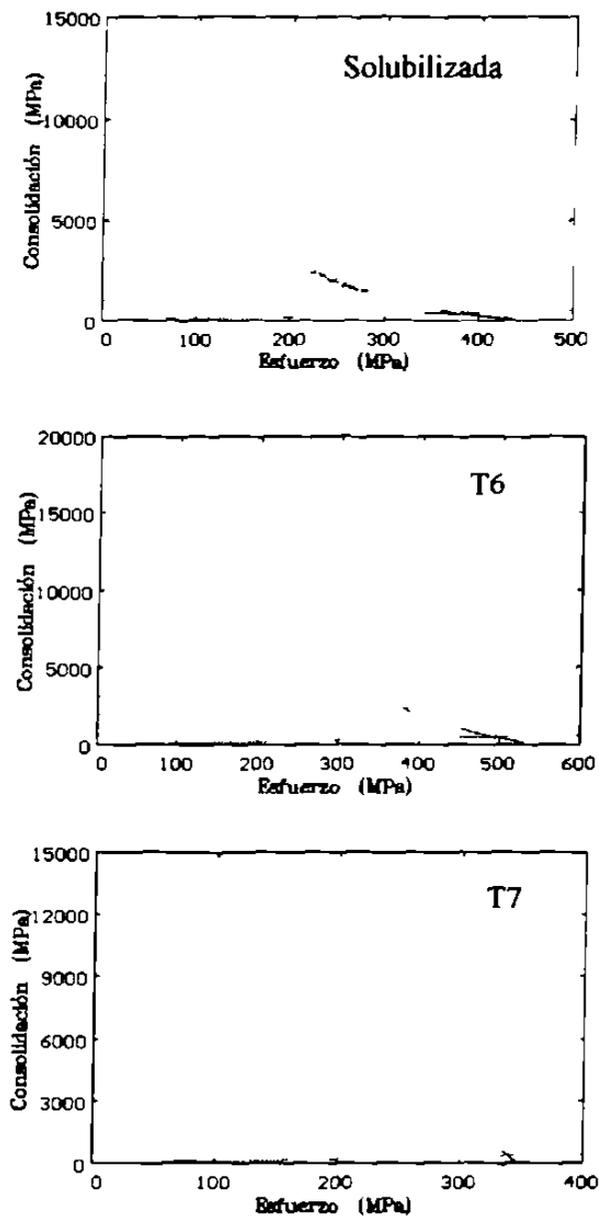


Fig. 5.26 Curvas de endurecimiento por deformación y criterio de Considère para la aleación modificada y refinada con tratamiento de solubilizado a 480 °C. En cada caso se indica la condición de tratamiento; los ensayos se realizaron a una velocidad inicial de deformación de 0.046 s⁻¹.

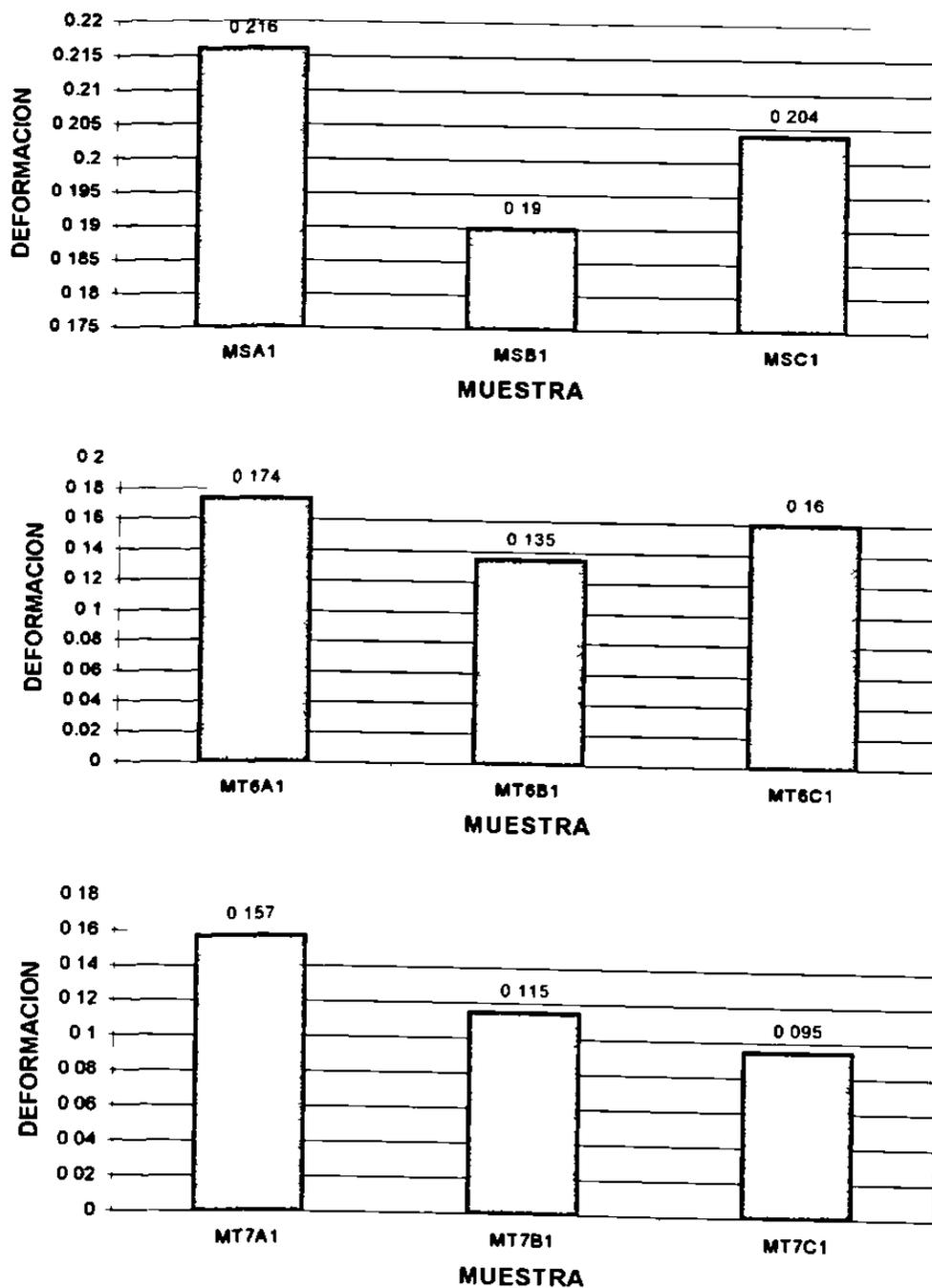


Fig. 5.27 Deformación en el límite del esfuerzo plástico uniforme para la aleación de estructura modificada en sus diferentes condiciones de prueba y de tratamiento. En todos los casos la velocidad inicial de deformación fue de 0.00046 s^{-1} .

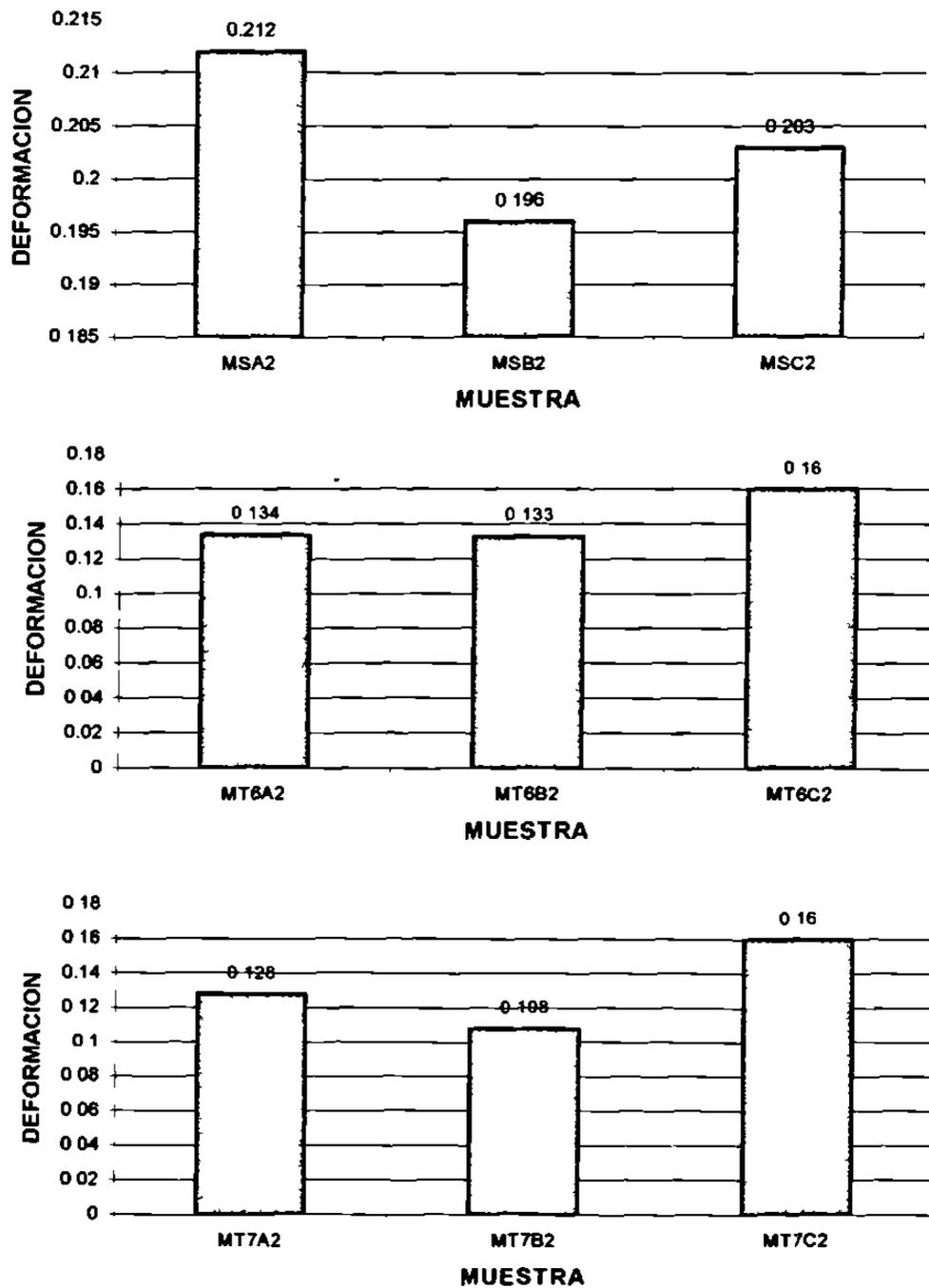


Fig. 5.28 Deformación en el límite del esfuerzo plástico uniforme para la aleación de estructura modificada en sus diferentes condiciones de prueba y de tratamiento. En todos los casos la velocidad inicial de deformación fue de 0.0046 s^{-1} .

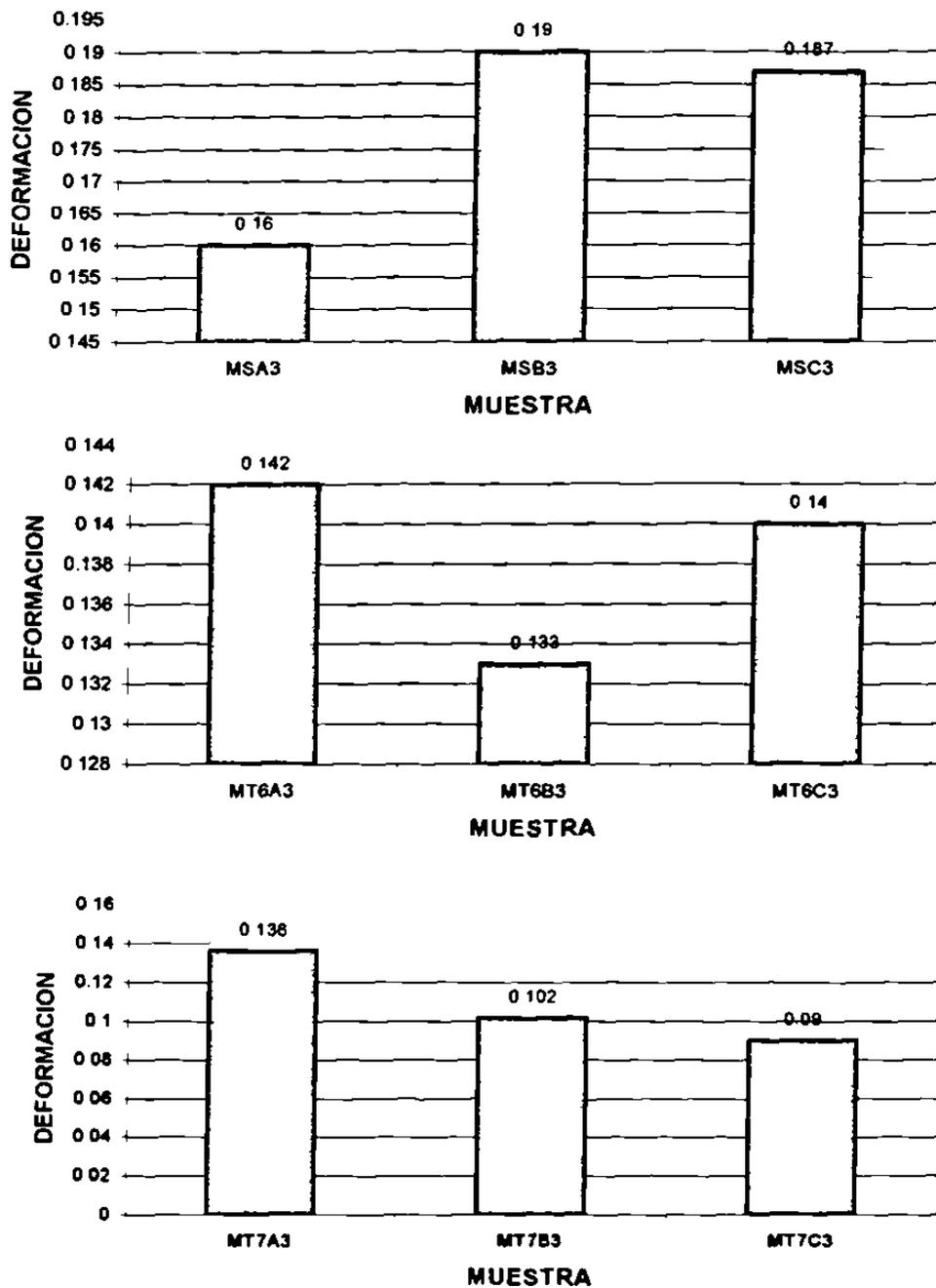


Fig. 5.29 Deformación en el límite del esfuerzo plástico uniforme para la aleación de estructura modificada en sus diferentes condiciones de prueba y de tratamiento. En todos los casos la velocidad inicial de deformación fue de 0.046 s^{-1} .

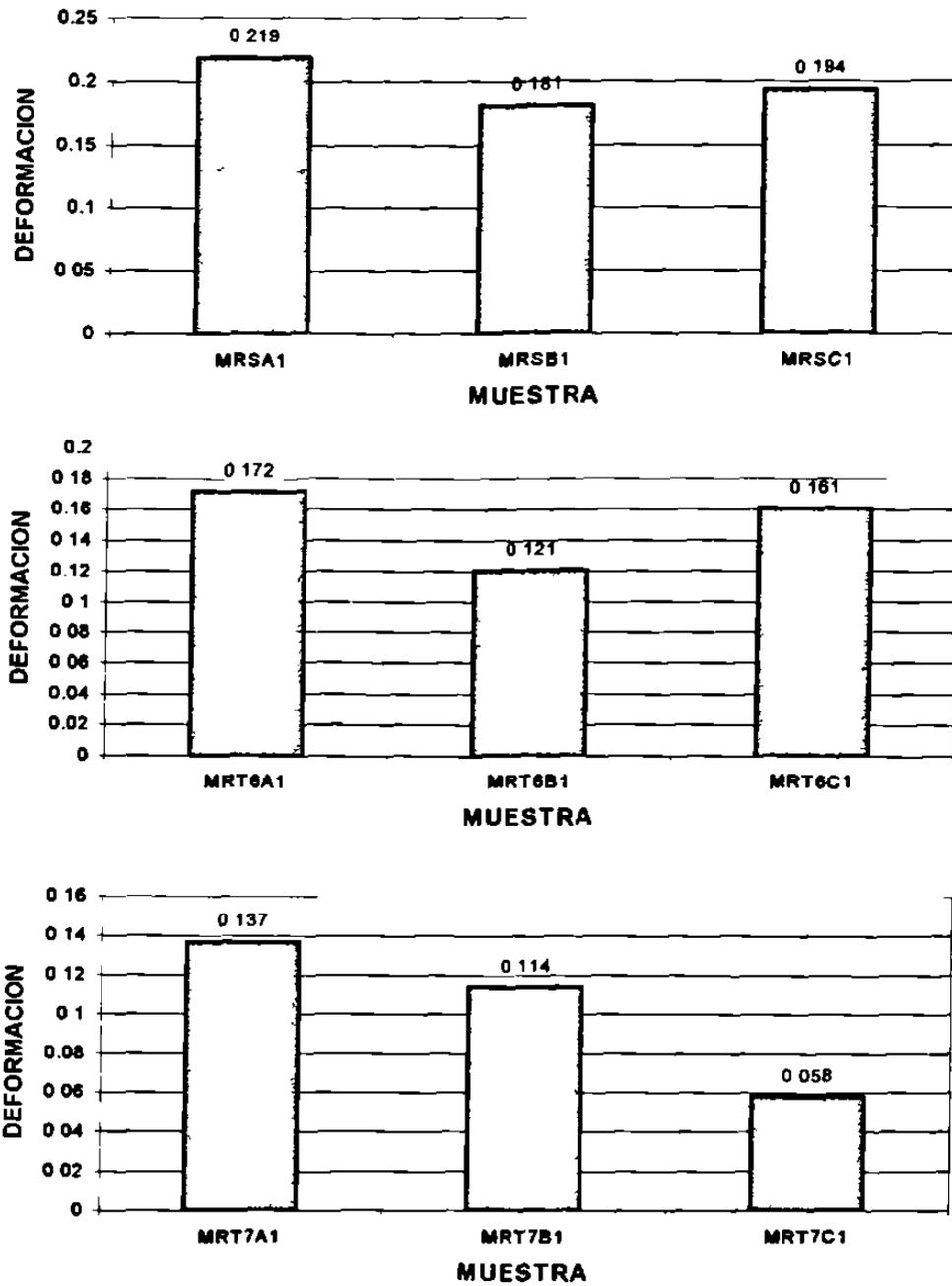


Fig. 5.30 Deformación en el límite del esfuerzo plástico uniforme para la aleación de estructura modificada y refinada en sus diferentes condiciones de prueba y de tratamiento. En todos los casos la velocidad inicial de deformación fue de 0.00046 s^{-1} .

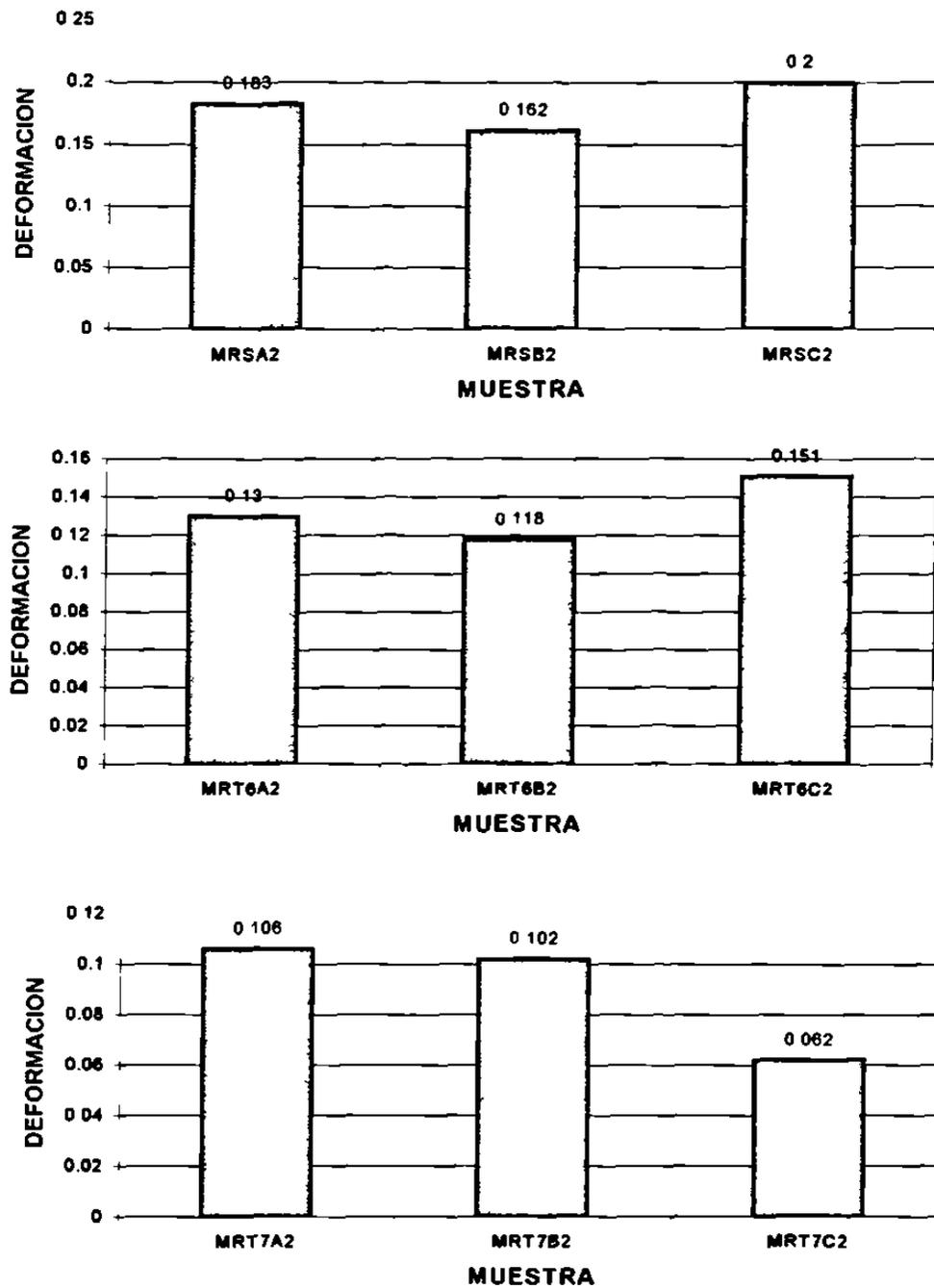


Fig. 5.31 Deformación en el límite del esfuerzo plástico uniforme para la aleación de estructura modificada y refinada en sus diferentes condiciones de prueba y de tratamiento. En todos los casos la velocidad inicial de deformación fue de 0.0046 s^{-1} .

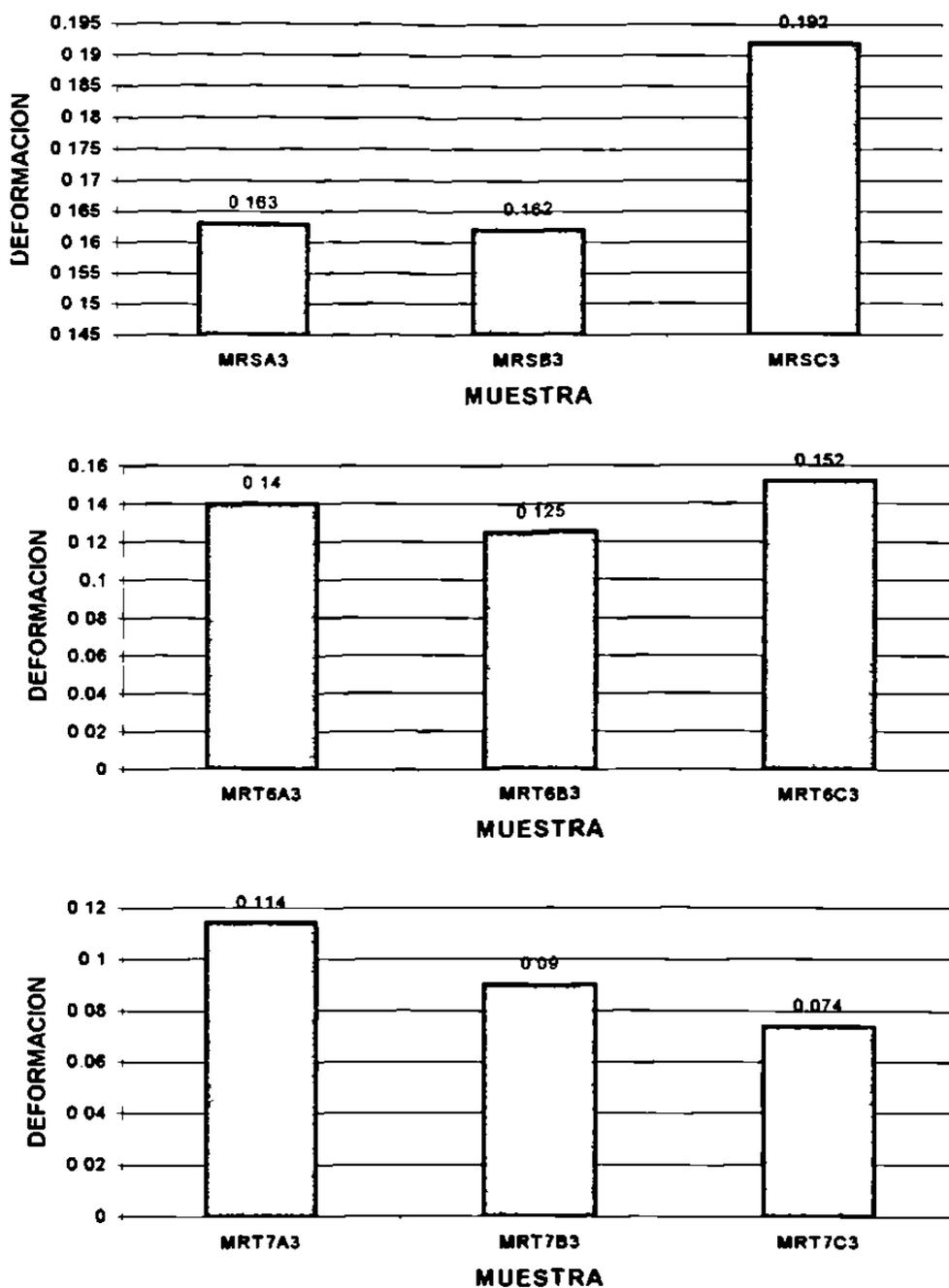


Fig. 5.32 Deformación en el límite del esfuerzo plástico uniforme para la aleación de estructura modificada y refinada en sus diferentes condiciones de prueba y de tratamiento. En todos los casos la velocidad inicial de deformación fue de 0.046 s^{-1} .

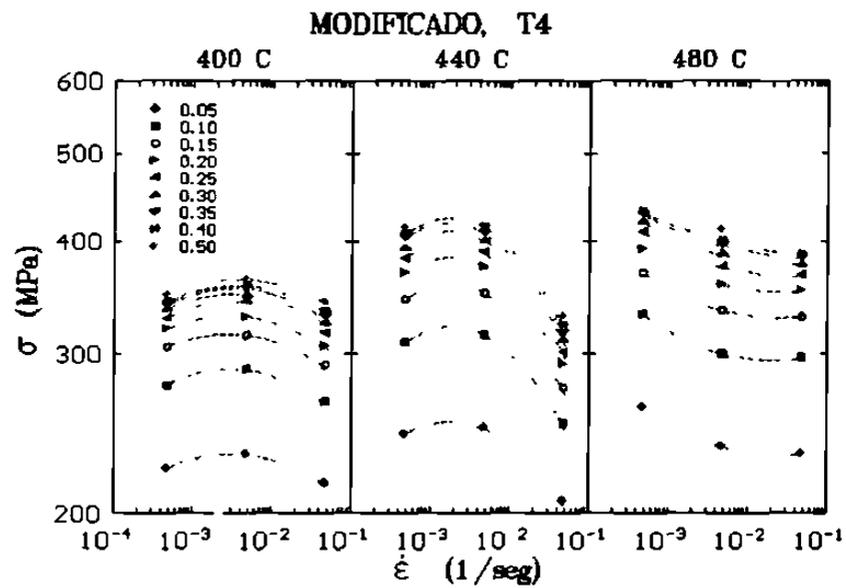


Fig. 5.33 Variación del esfuerzo con la velocidad de deformación para diferentes valores de deformación en la aleación modificada. Se indican el tratamiento y la temperatura de solubilizado.

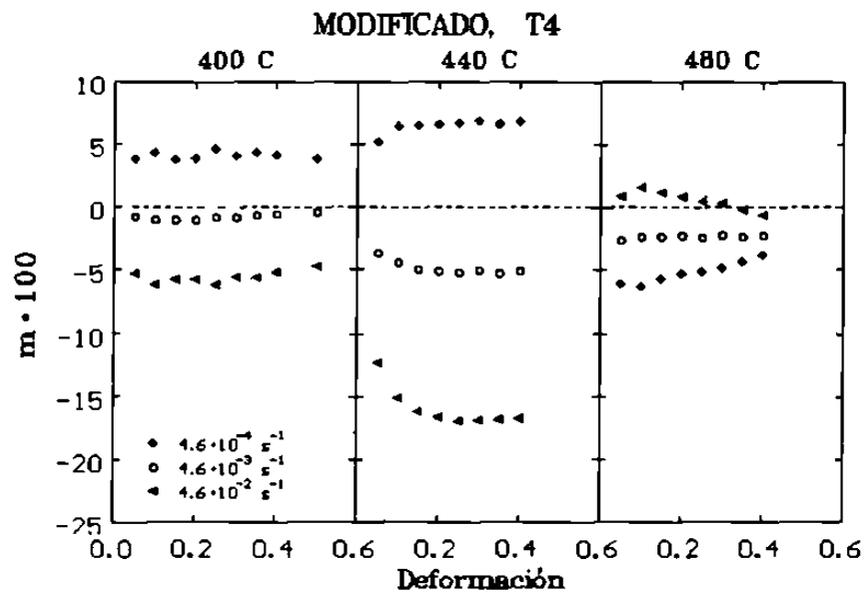


Fig. 5.34 Sensibilidad a la velocidad de deformación en función de la deformación para las diferentes velocidades de deformación en la aleación modificada. Se indican el tratamiento y la temperatura de solubilizado.

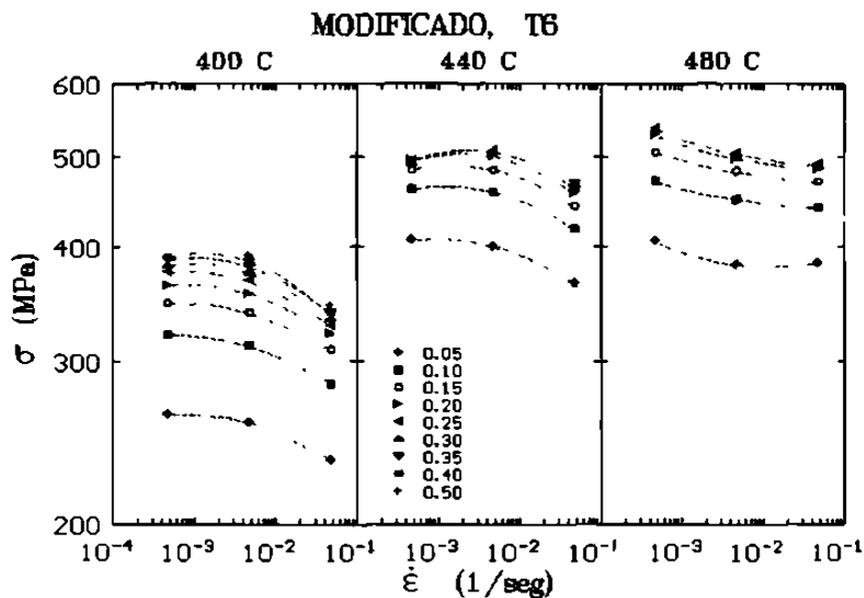


Fig. 5.35 Variación del esfuerzo con la velocidad de deformación para diferentes valores de deformación en la aleación modificada. Se indican el tratamiento y la temperatura de solubilizado.

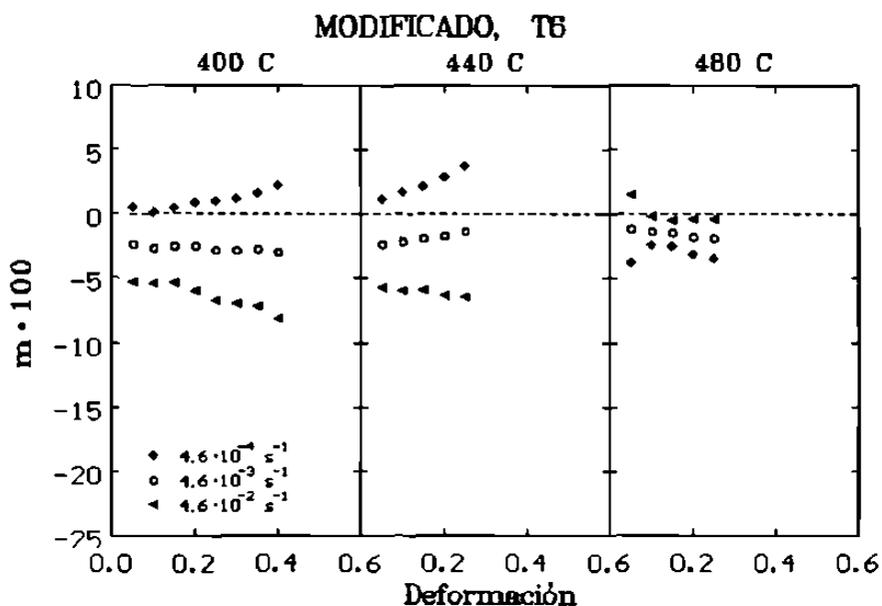


Fig. 5.36 Sensibilidad a la velocidad de deformación en función de la deformación para las diferentes velocidades de deformación en la aleación modificada. Se indican el tratamiento y la temperatura de solubilizado.

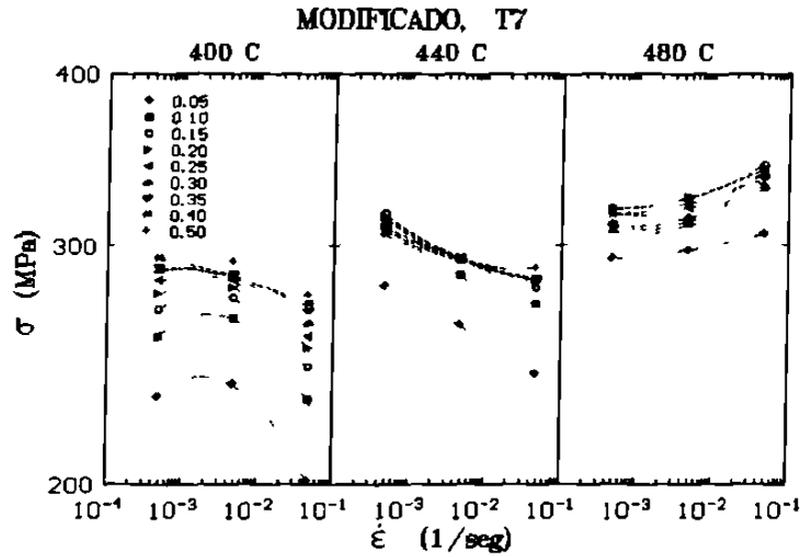


Fig. 5.37 Variación del esfuerzo con la velocidad de deformación para diferentes valores de deformación en la aleación modificada. Se indican el tratamiento y la temperatura de solubilizado.

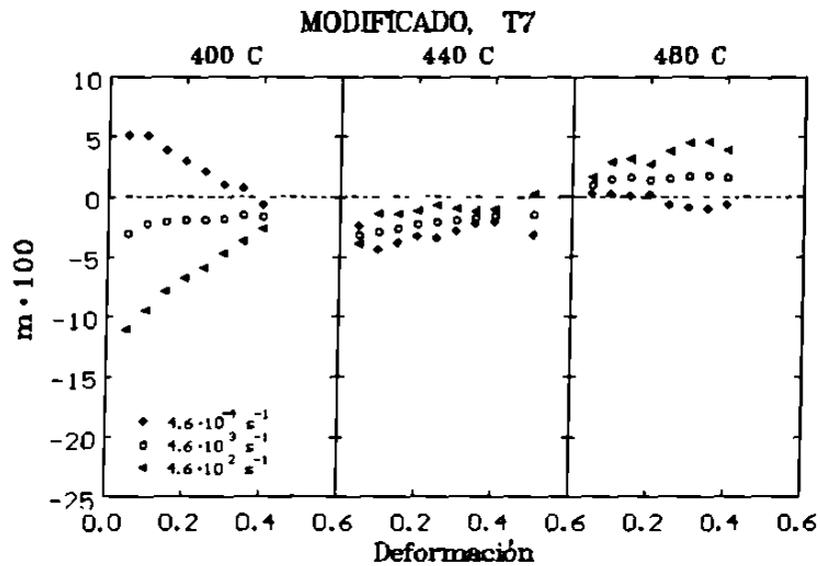


Fig. 5.38 Sensibilidad a la velocidad de deformación en función de la deformación para las diferentes velocidades de deformación en la aleación modificada. Se indican el tratamiento y la temperatura de solubilizado.

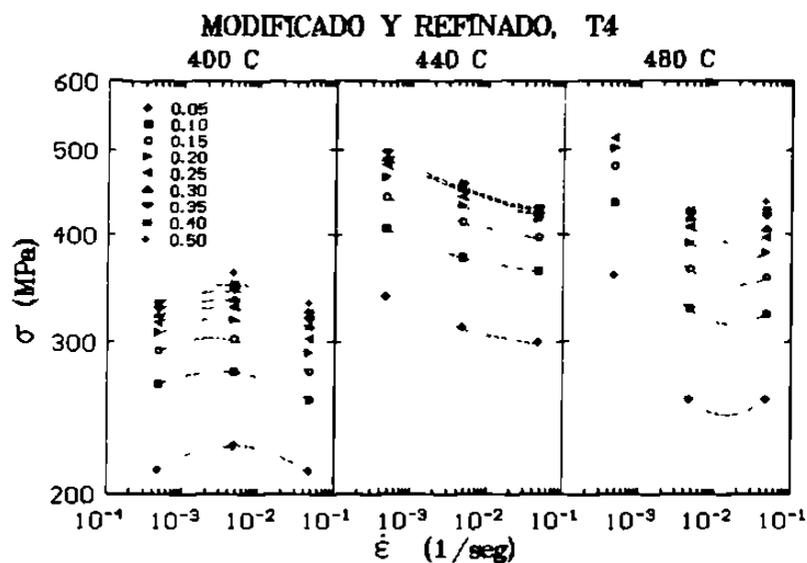


Fig. 5.39 Variación del esfuerzo con la velocidad de deformación para diferentes valores de deformación en la aleación modificada y refinada. Se indican el tratamiento y la temperatura de solubilizado.

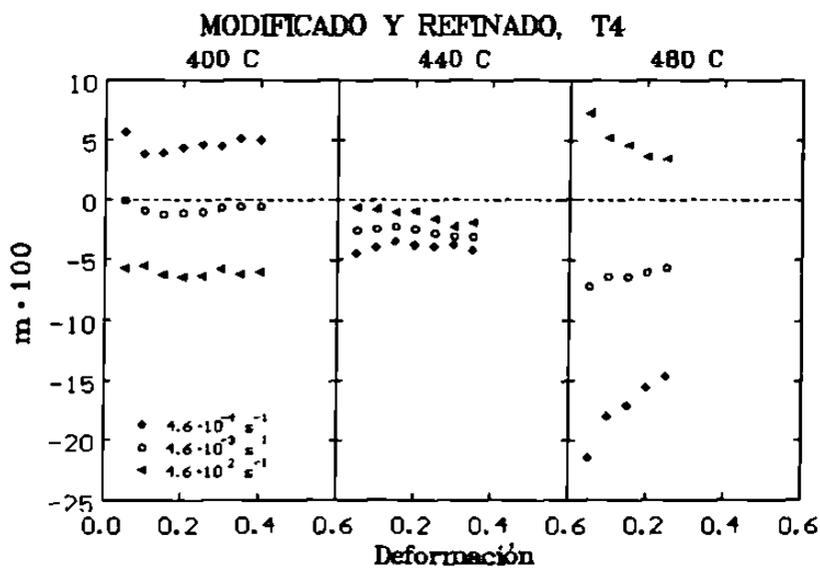


Fig. 5.40 Sensibilidad a la velocidad de deformación en función de la deformación para las diferentes velocidades de deformación en la aleación modificada y refinada. Se indican el tratamiento y la temperatura de solubilizado.

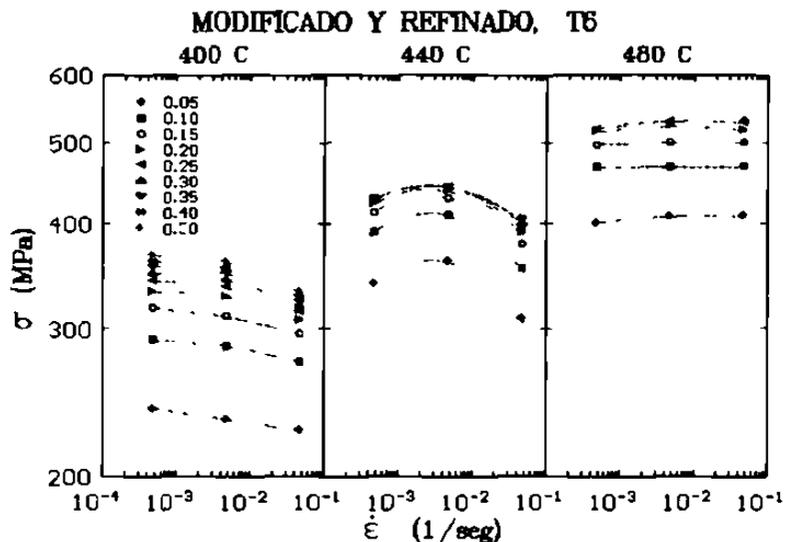


Fig. 5.41 Variación del esfuerzo con la velocidad de deformación para diferentes valores de deformación en la aleación modificada y refinada. Se indican el tratamiento y la temperatura de solubilizado.

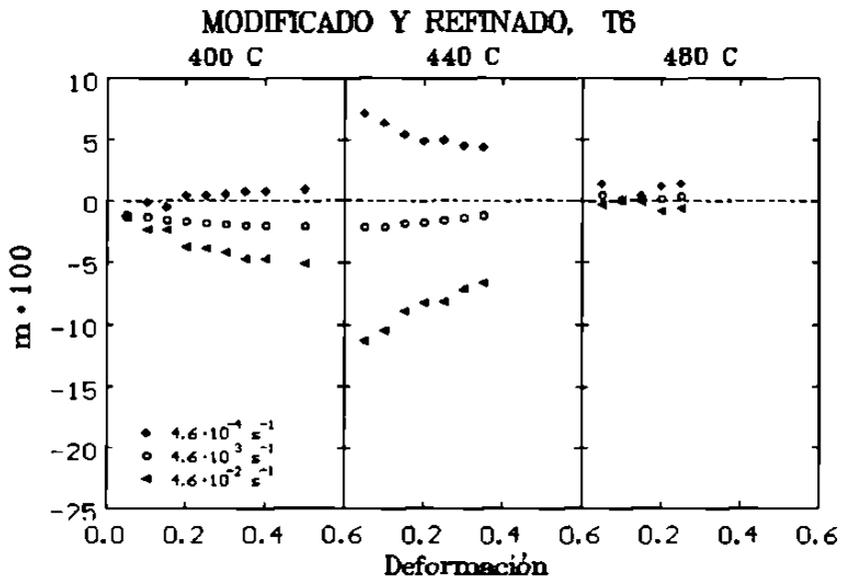


Fig. 5.42 Sensibilidad a la velocidad de deformación en función de la deformación para las diferentes velocidades de deformación en la aleación modificada y refinada. Se indican el tratamiento y la temperatura de solubilizado

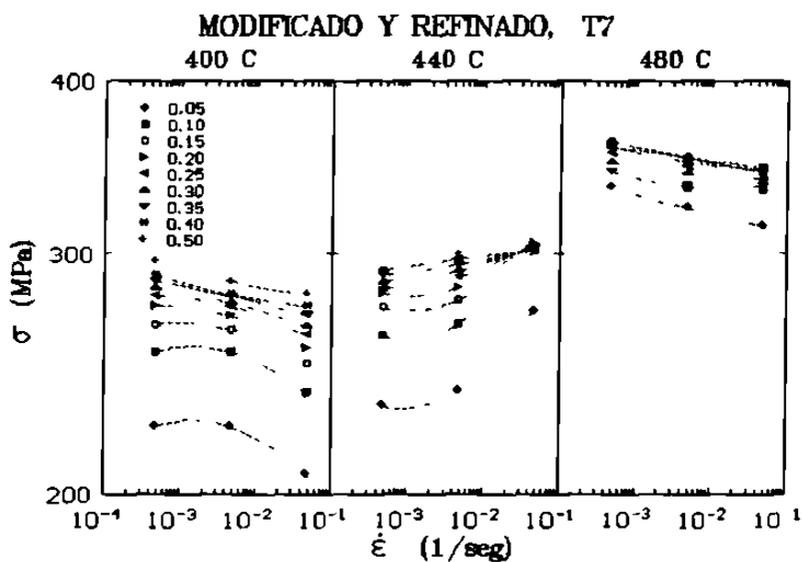


Fig. 5.43 Variación del esfuerzo con la velocidad de deformación para diferentes valores de deformación en la aleación modificada y refinada. Se indican el tratamiento y la temperatura de solubilizado.

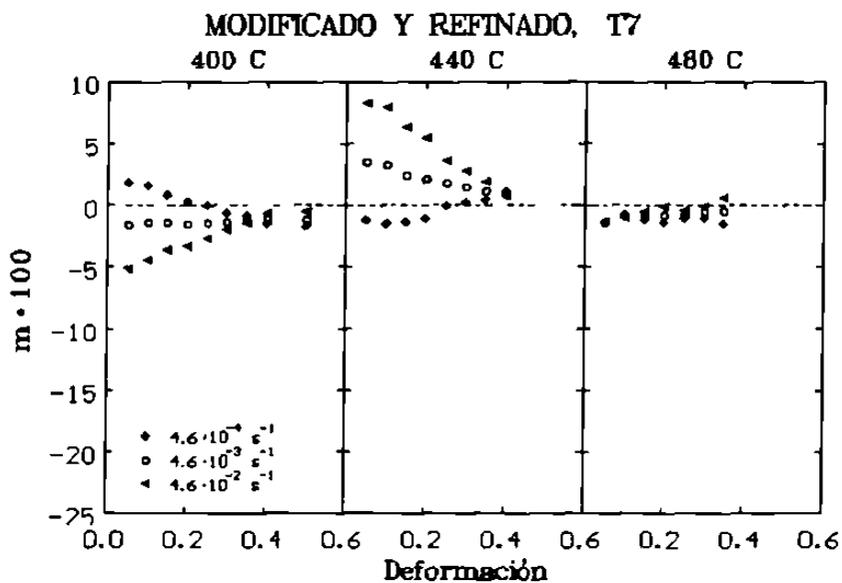


Fig. 5.44 Sensibilidad a la velocidad de deformación en función de la deformación para las diferentes velocidades de deformación en la aleación modificada y refinada. Se indican el tratamiento y la temperatura de solubilizado.

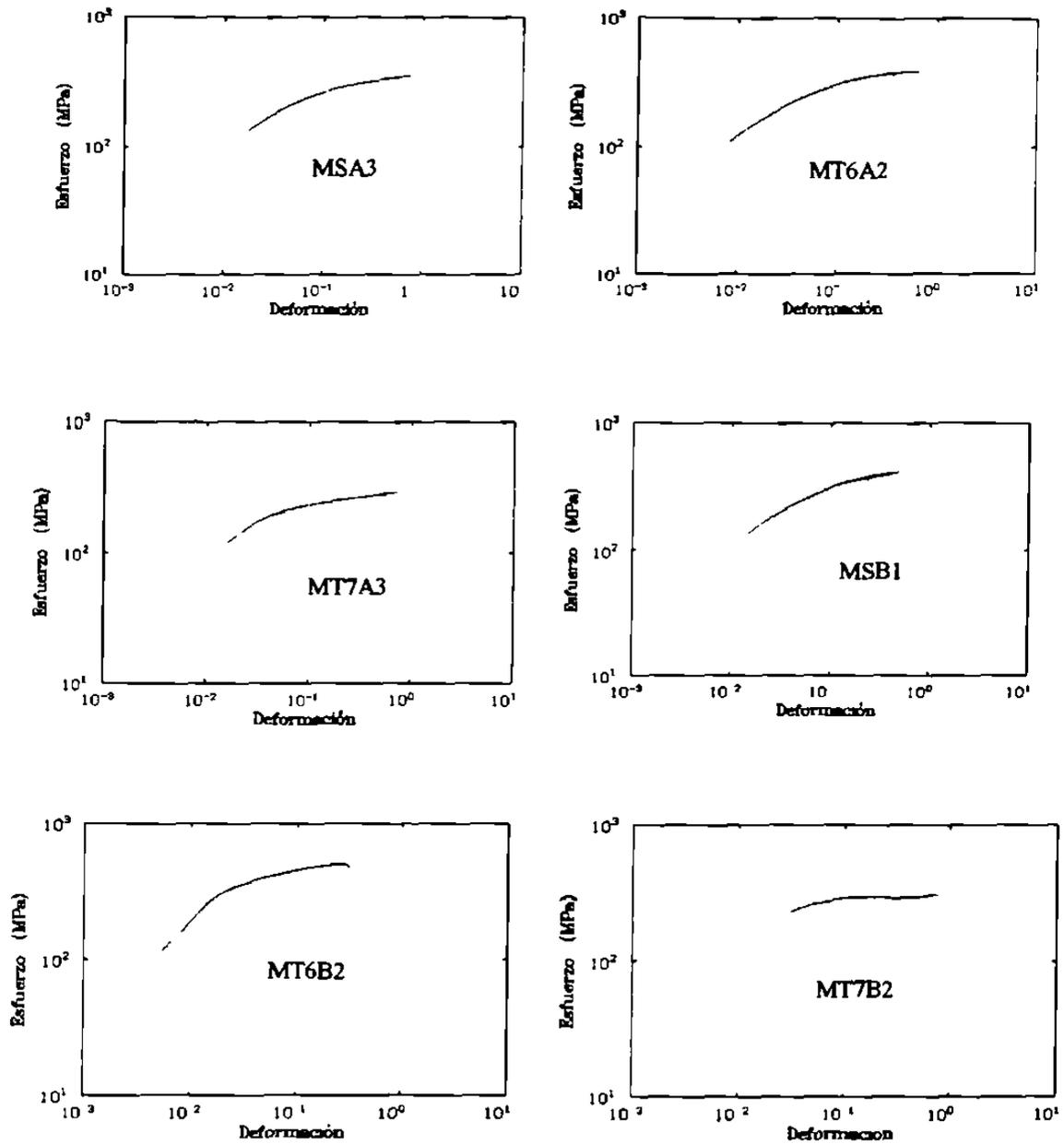


Fig. 5.45 Curvas de fluencia log-log para la determinación del exponente de endurecimiento por deformación (n) y el coeficiente de resistencia (K) en la aleación de estructura modificada. En cada caso se indican las condiciones de prueba y de tratamiento.

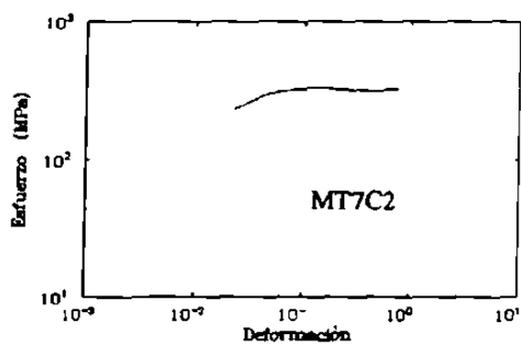
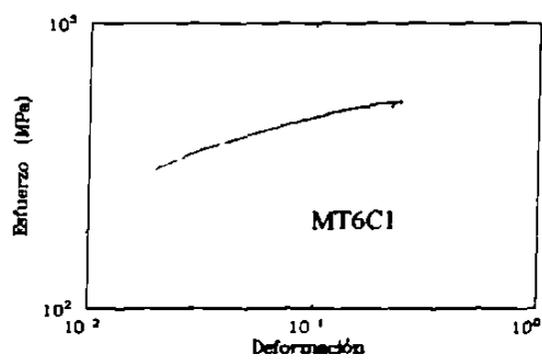
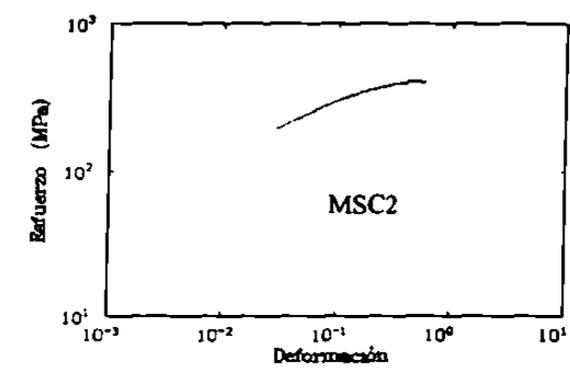


Fig. 5.45 Continuación

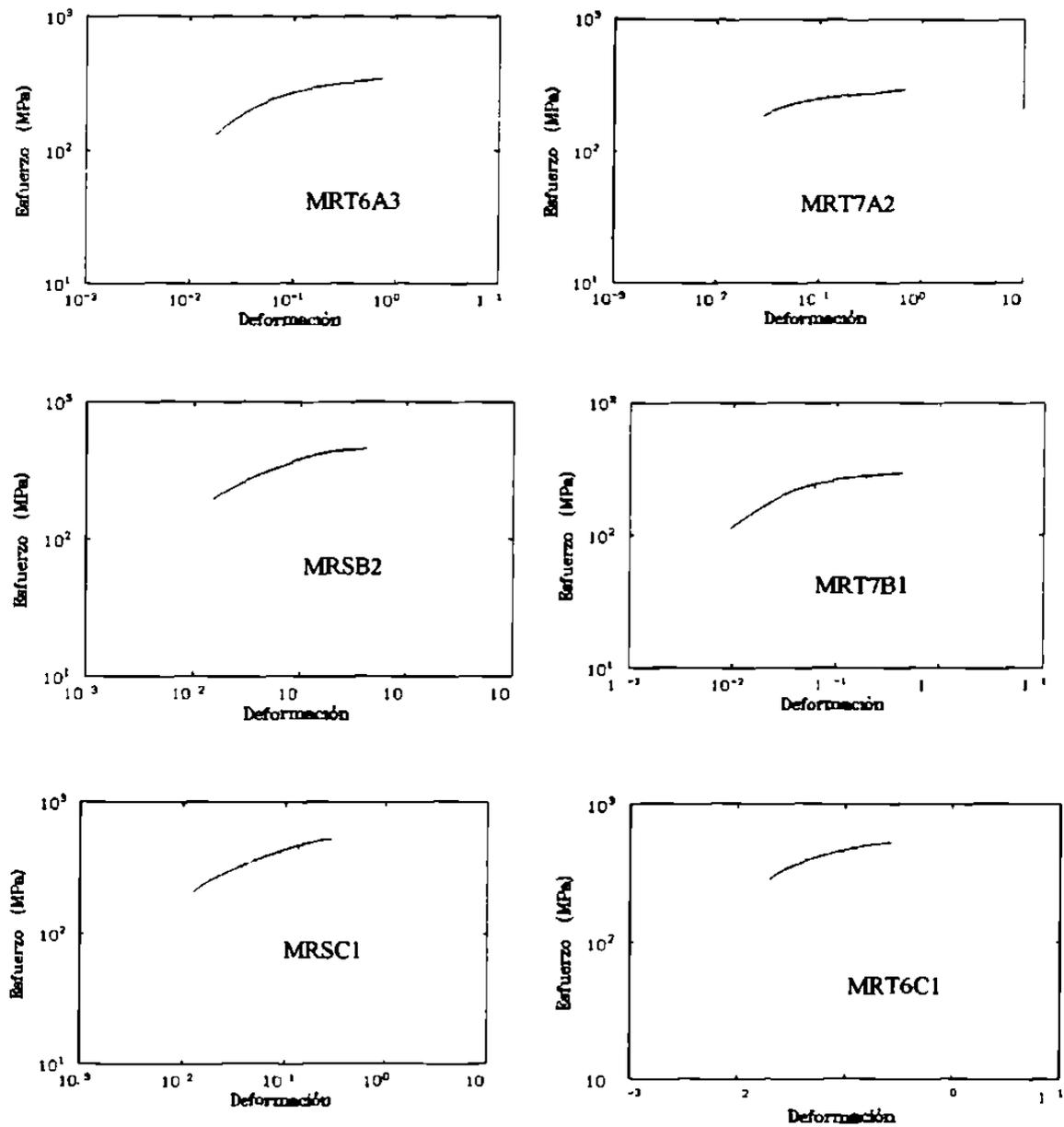


Fig. 5.46 Curvas de fluencia log-log para la determinación del exponente de endurecimiento por deformación (n) y el coeficiente de resistencia (K) en la aleación de estructura modificada y refinada. En cada caso se indican las condiciones de prueba y de tratamiento.

Capítulo 6

Análisis y Discusión de Resultados

6.1 Introducción

En este capítulo se analizan las curvas de fluencia, así como los resultados y propiedades mecánicas que reportaron las aleaciones en sus diferentes condiciones de prueba y de tratamiento.

Con respecto a este último punto, se describe el mecanismo de endurecimiento en las aleaciones de aluminio propuesto por algunos autores, lo cual ayudará a comprender los resultados obtenidos dependientes de la condición de tratamiento.

En lo referente a el efecto de la temperatura del tratamiento de solubilizado, se estudia la relación entre el grado de solubilidad que presentan los elementos de aleación responsables del endurecimiento y la temperatura del tratamiento, relacionando más adelante esto con las propiedades mecánicas en el material.

La tendencia del material a exhibir condiciones de inestabilidad plástica se explica a partir de las curvas de sensibilidad a la velocidad de deformación,

mientras que a través de las curvas de fluencia en escala log-log se determinan el exponente de endurecimiento por deformación y el coeficiente de resistencia.

6.2 Efecto del Tratamiento Térmico sobre la Dureza y la Resistencia del Material

El concepto de dureza está relacionado con la medida de la resistencia del material a presentar deformación plástica permanente y su definición varía según la interpretación o experiencia del operario que conduce la prueba; de este modo, la dureza puede representar la resistencia a la indentación, una medida del flujo plástico, o bien la resistencia al desgaste [1].

En las aleaciones de aluminio, el endurecimiento se lleva a cabo mediante la precipitación de partículas finas y dispersas de segundas fases, siendo éste conocido como endurecimiento por precipitación. Se realiza mediante diferentes tratamientos térmicos representados en forma esquemática en relación con la dureza alcanzada en la figura 6.1.

La figura 5.2 muestra los valores de dureza Vickers obtenidos en las aleaciones bajo estudio sometidas a los diferentes tratamientos térmicos. Puede observarse que conforme se incrementa la temperatura del tratamiento de solubilizado se incrementa también la dureza adquirida por el material. Este comportamiento se explica mediante el diagrama de fases Al-Cu (fig. 3.20); en él se aprecia que conforme se incrementa la temperatura del tratamiento de solubilizado, por ejemplo a 480 °C aumenta también la disolución de elementos formadores de precipitados (Cu en este caso), lo cual resultará en la obtención de una solución sólida supersaturada más concentrada que la que se habría obtenido a una temperatura de solubilizado de 400 °C. Por lo tanto, el tratamiento de envejecimiento será más efectivo dado que un incremento en el gradiente de concentración de soluto en la solución es la fuerza motriz del proceso de la difusión por el cual se lleva a cabo el envejecimiento [2].

En lo que se refiere a las durezas obtenidas en los tratamientos T6 (dureza máxima) y T7 (sobreenvejecido), la figura 3.21 muestra la relación entre la dureza obtenida para distintas combinaciones de tiempo y temperatura en el tratamiento de envejecimiento. Se puede observar que la dureza (y las propiedades de resistencia por consiguiente) pasan a través de un valor máximo para después disminuir en forma considerable al paso del tiempo; esto muestra la diferencia entre el tratamiento T6 y T7. Este comportamiento está asociado al tamaño de las partículas precipitadas; al ser muy grandes el espacio entre partículas aumenta y dejan de ser efectivas para impedir o retardar el movimiento de las dislocaciones y en consecuencia la dureza disminuye [3,4,5]. La formación de partículas de tamaño y distribución óptimos será más rápida a más altas temperaturas, de manera que el máximo en la dureza se alcanzará en tiempos más cortos [6], aunque por ser de mayor tamaño ofrecen menor resistencia al paso de las dislocaciones.

6.3 Curvas de Fluencia

Las figuras 5.3 a 5.14 presentan las gráficas de esfuerzo contra deformación verdaderos o curvas de fluencia que mostró el material en las diversas condiciones de tratamiento y de prueba a que fue sometido. Con el objeto de observar el efecto de la temperatura del tratamiento de solubilizado sobre estas curvas, se presentan en forma comparativa para cada velocidad inicial de deformación y condición de tratamiento (figs. 5.3 - 5.8).

De igual manera, el efecto de la condición de tratamiento sobre las curvas de fluencia se hace evidente en las gráficas comparativas para los diversos tratamientos térmicos en estudio (figs. 5.9 – 5.14).

En algunas de estas gráficas, por ejemplo las figs. 5.3 ó 5.8 entre otras, se puede apreciar la aparición del envejecimiento dinámico por deformación o cedencia discontinua, conocido también con el nombre de " efecto Portevin-

LeChatelier⁷, el cual se caracteriza por la aparición de zonas dentadas en las curvas de fluencia y que se asocian con la aparición sucesiva de cedencia y envejecimiento durante la prueba, producto de la interacción entre átomos en solución sólida y dislocaciones (sección 2.3.5).

6.4 Resistencia Mecánica

Las figuras 5.15 a 5.20 muestran los resultados obtenidos de la resistencia mecánica en las aleaciones para las distintas condiciones de prueba y de tratamiento; en ellas se aprecia el incremento en los valores del esfuerzo de cedencia y resistencia máxima conforme se incrementa la temperatura del tratamiento de solubilizado. En adición a lo expuesto sobre el aumento en la resistencia de las aleaciones de aluminio, se encuentran también en la literatura [7] conceptos más actualizados sobre el endurecimiento por precipitación, a saber: en la teoría de dislocaciones se considera que el máximo endurecimiento se encuentra relacionado tanto a un tamaño de núcleo crítico de partículas, como a la interferencia al deslizamiento ocasionado por partículas que precipitan en planos cristalográficos; ésto debido a que la resistencia en las aleaciones que endurecen por envejecimiento se controla mediante la interacción que exhiben los precipitados con las dislocaciones en movimiento.

6.5 Esfuerzo Plástico Uniforme

El esfuerzo plástico uniforme máximo es el esfuerzo que se produce justo antes de que inicie la inestabilidad plástica en el material. Un material plástico ideal en el cual no ocurre endurecimiento por deformación se volvería inestable tan pronto ocurriera la cedencia bajo cargas de tensión; sin embargo, los metales sufren endurecimiento por deformación, lo cual tiende a incrementar su capacidad de soportar carga conforme aumenta la deformación [8]. La

deformación localizada o estricción en tensión se inicia en el valor de carga máxima, esta condición de inestabilidad se define por la condición:

$$dP = 0 \quad (6.1)$$

$$P = \sigma A \quad dP = \sigma dA + A d\sigma \quad (6.2)$$

Por constancia de volumen:

$$\frac{dL}{L} = - \frac{dA}{A} = d\varepsilon \quad (6.3)$$

y por la condición de inestabilidad:

$$\frac{dA}{A} = - \frac{d\sigma}{\sigma} \quad (6.4)$$

por lo tanto, en el punto de inestabilidad por tensión:

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = \sigma \quad (6.5)$$

Las figuras 5.21 a 5.26 muestran las gráficas a partir de las cuales se obtuvo el esfuerzo plástico uniforme considerando el criterio descrito por la ecuación (6.5). Los valores de estos esfuerzos se presentan en las figuras 5.15 a 5.20.

6.6 Ductilidad y Deformación Plástica Uniforme

En lo referente a las características de ductilidad en las muestras analizadas, se concluye que debido a que la mayoría de éstas no presentaron fractura, las mediciones del porcentaje de aumento de área y porcentaje de reducción de longitud no son representativas para definir el grado de ductilidad del material bajo estudio. El hecho de que las muestras no presentaran fractura se asocia a la escasa presencia de fases o compuestos inherentemente frágiles, así como al nivel de carga soportado por las muestras. Cabe señalar que el límite final de estas pruebas se dio por cualquiera de los siguientes dos casos: la saturación en el nivel de carga soportada o el haber llevado el material a un límite de deformación previamente establecido del 50% de su longitud. No obstante, en lo que se refiere a la deformación en el material, las figuras 5.27 a 5.32 muestran en forma gráfica los valores encontrados de la deformación en el límite del esfuerzo plástico uniforme.

6.7 Relación entre el Esfuerzo y la Velocidad de Deformación

Las figuras 5.33, 5.35 y 5.37 para la aleación de estructura modificada y las figuras 5.39, 5.41 y 5.43 en la aleación de estructura modificada y refinada, muestran la relación que guardan el esfuerzo en el material con la deformación para las diferentes velocidades de deformación a que se sometieron las aleaciones; de esta manera se relaciona al esfuerzo con la velocidad de deformación. En ellas puede observarse la variación que presenta el esfuerzo al modificar la temperatura en el tratamiento de solubilizado, así como la variación en el esfuerzo con la velocidad de deformación. A través de esta variación en el esfuerzo se determina la tendencia del material a exhibir problemas de inestabilidad plástica, o bien, lo que se conoce como localización del flujo plástico durante el proceso de deformación.

En estas curvas se observan, además, los niveles de esfuerzo alcanzados por el material en las diferentes condiciones de prueba y de tratamiento; por ejemplo, en la figura 5.35 para la aleación de estructura modificada en condición T6 para una temperatura del tratamiento de solubilizado de 480 °C y a baja velocidad de deformación, se observan valores de esfuerzos de hasta 550 Mpa, mientras que para las mismas condiciones de prueba a 400 °C de temperatura de solubilizado el esfuerzo alcanzado es de 390 Mpa. Análisis comparativos semejantes pueden hacerse para las diferentes condiciones de prueba y de tratamiento.

6.8 Sensibilidad a la Velocidad de Deformación

Las curvas analizadas en el párrafo anterior en las que se grafica el esfuerzo contra la velocidad de deformación en escalas logarítmicas se utilizan para determinar el valor de la sensibilidad a la velocidad de deformación (m), el cual se define por:

$$m = \frac{d(\ln \sigma)}{d(\ln \dot{\varepsilon})} \quad (6.6)$$

Las figuras 5.34, 5.36 y 5.38 para la aleación modificada y las figuras 5.40, 5.42 y 5.44 para la aleación modificada y refinada, muestran la dependencia de la sensibilidad a la velocidad de deformación con la deformación para las diferentes condiciones de tratamiento y velocidad inicial de deformación. Como se puede apreciar, el valor de la sensibilidad cambia con la deformación y además, en ocasiones presenta magnitud positiva y a veces negativa; Este valor negativo en la magnitud de la sensibilidad a la velocidad de deformación es indicativo de que el material tiene alta tendencia a localizar la deformación plástica, es decir, a presentar problemas de inestabilidad plástica [9,10,11].

La concentración en la deformación implica un aumento local en la velocidad de deformación en algunas regiones debido a que se debe presentar mucha más deformación en el mismo tiempo de prueba. La dureza de esas regiones particulares dependerá en el valor de m , de tal manera que si su valor es positivo se debe a que se encuentra material más duro y material más suave si el valor de m es negativo [12]. Esta disminución en la dureza o resistencia favorece el progreso de la localización en la deformación.

El valor de la sensibilidad a la velocidad de deformación normalmente es bastante pequeño en los metales (<0.1) a temperatura ambiente; es un buen indicador de los cambios que ocurren en lo que a la deformación se refiere y proporciona una relación entre los conceptos de dislocaciones durante la deformación plástica y las mediciones macroscópicas observadas en las pruebas [13].

Las figuras 5.34, 5.36 y 5.38 analizadas para una temperatura de solubilizado de 480 °C y a una velocidad de deformación intermedia de 0.0046 s⁻¹, muestran que el flujo plástico tenderá a localizarse con mayor intensidad en las condiciones T4 y T6 (valor de m negativo), mientras que la condición T7 exhibe una condición estable en la deformación plástica. El valor negativo de m en las aleaciones endurecidas por precipitación es asociado a la difusión de átomos de soluto hacia las dislocaciones temporalmente bloqueadas [14,15], así como al rompimiento y destrucción de partículas de precipitados por las dislocaciones en movimiento [16,17,18,19]. Se ha propuesto [20,21] que estos mecanismos son los responsables de las fracturas en las aleaciones de aluminio.

A 440 °C de temperatura de solubilizado para las mismas gráficas, se observan condiciones de inestabilidad en todas las situaciones, excepto en las muestras con tratamiento T4 y T6 a baja velocidad de deformación. Con respecto a las muestras modificadas y con tratamiento de solubilizado a 400 °C, es evidente la

condición estable en las tres condiciones de tratamiento para baja velocidad de deformación.

Siguiendo con razonamientos similares, para la aleación en condición de estructura modificada y refinada (figuras 5.40, 5.42 y 5.44), se aprecian claras condiciones de inestabilidad en el tratamiento T4 a baja y media velocidad inicial de deformación. Para temperatura de solubilizado de 480 °C, las condiciones T6 y T7 exhiben cambios en el signo de la sensibilidad a la velocidad de deformación.

Para 440 °C en la temperatura de solubilizado y a velocidad inicial de deformación intermedia, se observa un flujo plástico estable sólo en la condición T7. A 400 °C de temperatura de solubilizado el flujo es parcialmente estable a baja velocidad inicial de deformación en las condiciones T6 y T7, mientras que mostró estabilidad completa a baja velocidad de deformación.

Como se estableció antes, el valor de la sensibilidad a la velocidad de deformación está relacionado con la manera en que interactúan las dislocaciones con las partículas de precipitados o con alguna otra partícula extraña presente en el material; el cambio de signo en el valor de m de positivo a negativo se puede deber a que en un principio el material presenta estabilidad de flujo plástico, pero conforme se incrementa la deformación, las dislocaciones en movimiento atraviesan las partículas precipitadas con mayor facilidad, lo que se traduce como un ablandamiento del material llevando ésto eventualmente a una condición de flujo plástico inestable.

Por el contrario, el cambio de signo en m de negativo a positivo se asocia al bloqueo impuesto por alguna partícula sobre las dislocaciones, dando ésto como resultado un efecto de estabilidad plástica en el material.

6.9 Relación entre el Esfuerzo Verdadero y la Deformación Verdadera

Existe un considerable número de materiales y aleaciones para los cuales la relación entre el esfuerzo y la deformación verdaderos en la zona plástica muestran una relación aproximadamente lineal cuando se grafican en escalas logarítmicas; ésto es, siguen la relación [22]:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (6.7)$$

en la cual K es el coeficiente de esfuerzo y n el exponente de endurecimiento por deformación. Como se estableció en el capítulo 2, el valor de n puede obtenerse a partir de la pendiente de la recta que se observa al graficar σ contra ε en escalas logarítmicas.

Las figuras 5.45 y 5.46 muestran algunas de estas curvas para las aleaciones en estudio; en ellas se aprecia cómo la relación lineal no es del todo evidente, dado a que no existe un fundamento físico que indique la compatibilidad de las curvas de fluencia con la expresión 6.7. No obstante, puede apreciarse la relación lineal en una porción de la curva dentro de la zona plástica. La Tabla 5.1 muestran los valores de n y K obtenidos a partir de esta porción recta.

Como se estableció anteriormente en la sección 2.3.6, este valor de n representa el valor de la deformación en el punto de inestabilidad plástica, o expresado de otra manera, representa el grado de deformación plástica uniforme que el material puede alcanzar bajo el ensayo. Valores altos de n son deseables en las condiciones de trabajo mecánico de los metales.

Bibliografía

- [1].- ASM Handbook vol 8, ASM International (1991), pp 71-73
- [2].- J.W. Martin, "Micromechanisms in Particle-Hardened Alloys", Cambridge University Press, Great Britain (1980) pp 6-41
- [3].- CH. R. Brooks "Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys" , American Society for Metals pp 95-105
- [4].- H. Gleiter in R.W. Cahn and P. Haasen (eds.), Physical Metallurgy, North Holland, Amsterdam, 1983, p 649, 3rd. Ed.
- [5].- J. W. Martin and R. D. Doherty, "Stability of Microstructure in Metallic Systems", Cambridge University Press, Cambridge, 1976
- [6].- CH. R. Brooks "Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys", American Society for Metals pp 95-105
- [7].- I. J. Polmear, "Light Alloys, Metallurgy of the Light Metals" 3rd edition, Arnold editors (1995), pp 29-37
- [8].- ASM Handbook vol 8, ASM International (1991), p 25
- [9].- E. W Hart, "Acta Metall." 15 (1967) 351.
- [10].- E. Pink and A. Grinberg, "Aluminum E." 60 (1984) E 602.
- [11].- G. Lutjering and S Weissman, "Acta Metall " 18 (1970) 18.
- [12].- R. Colás, A. Grinberg, "Plastic Instability in a heat-treatable Aluminum Alloy" Mat. Sci Eng. A161 (1993) 201-208
- [13].- G. E. Dieter "Mechanical Metallurgy" 2nd ed Mc. Graw Hill (1976), pp. 350-353
- [14].- P. G. Mc. Cormick, "Acta Metall ", 20 (1972) 351.
- [15].- A. Van den Beukel, "Phys. Status Solidi A", 30 (1975) 197.
- [16].- S. Nourbakhsh and J Nutting "Acta Metall ", 28 (1980) 357
- [17].- P. G. Mc. Cormick, "Scripta Metall." 15 (1981) 441.

- [18] - G. Lutjering and S. Weissman, "Acta Metall." 18 (1970) 18.
- [19].- J. D. Evensen, N. Ryum and J. D. Embury, " Mater Sci. Eng." 18 (1975) 221.
- [20].- N. Chung, J. D. Embury, J. D. Evensen, R. G. Hoagland and C. M. Sargent, "Acta Metall." 25 (1977) 377.
- [21].- B. Anderson, "Mem.Sci. Rev. Metall." 77 (1985) 193.
- [22].- J. Marin "Mechanical Behaviour of Engineering Materials", Prentice Hall (1962) , pp 38-40
- [23].- D. Zalensas, "Aluminum Casting Technology", 2nd edition, AFS, USA (1993)

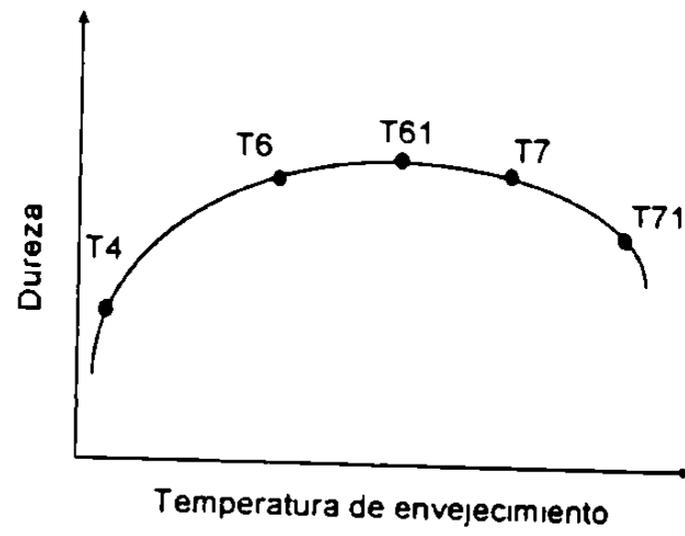


Fig 6 1 Curva de dureza maxima para el aluminio envejecido [23]

Capítulo 7

Conclusiones

De acuerdo a las distintas pruebas y condiciones bajo las cuales se analizaron los dos tipos de estructura en las aleaciones de aluminio 319, se tiene por conclusión lo siguiente.

- Independientemente de la estructura, el material adquiere mayor dureza cuando el tratamiento de solubilizado a que se somete se realiza a una temperatura de 480 °C.
- El material solubilizado a una temperatura de 480 °C independientemente de la estructura, es más resistente en sus condiciones de tratamiento T6 y T7, resultando ser más blando en la condición T4
- En ambas estructuras y para los tratamientos T6 y T7, los mayores valores tanto de resistencia en cedencia como de resistencia máxima se obtienen cuando la temperatura del tratamiento de solubilizado es de 480 °C

- En las dos condiciones de estructura y a 400 °C de temperatura de solubilizado, la resistencia en cedencia se mantiene constante para cualquier condición de tratamiento.
- El incremento en el esfuerzo de cedencia debido al tratamiento T6 se acentúa en la aleación únicamente modificada.
- La aleación modificada y refinada en condición de solubilizado, exhibe mayores valores de resistencia en cedencia
- Debido a que la mayoría de las muestras no exhibieron fractura, las características de ductilidad en función del porcentaje de aumento de área y del porcentaje de reducción en longitud no resultan ser representativos para el material bajo estudio
- En forma predominante, la deformación en el límite del esfuerzo plástico uniforme resultó ser más amplia en las muestras con temperaturas de solubilizado de 400 °C en cualquier condición de tratamiento y tipo de estructura.
- El valor del esfuerzo plástico uniforme tiende a ser mayor cuanto mayor es el esfuerzo máximo en el material, es decir a mayor valor del esfuerzo máximo, menor es la diferencia entre los valores del esfuerzo plástico uniforme y la resistencia máxima
- La aleación de estructura modificada y refinada para temperatura de solubilizado a 480 °C en las condiciones T6 y T7, muestra valores de sensibilidad a la velocidad de deformación muy cercanos a cero mientras que la condición T4 o solubilizado exhibe considerable inestabilidad

- Ambas estructuras exhiben mayores condiciones de estabilidad cuando la temperatura del tratamiento de solubilizado es de 480 °C.
- La estructura únicamente modificada presenta mayores valores en el exponente de endurecimiento por deformación (n).

Sugerencias y Recomendaciones a Trabajos Futuros

Con el objeto de abundar más en el conocimiento de este tipo de aleaciones, a continuación se presentan algunas sugerencias que podrían complementar el presente estudio:

- En este trabajo todos los ensayos se realizaron a temperatura ambiente, por lo que pruebas a otras temperaturas serían de gran utilidad en esta clase de materiales
- Es recomendable efectuar pruebas de tensión sobre el material con el objeto de estudiar otro tipo de propiedades como la ductilidad, tenacidad, o bien realizar estudios sobre fractografía.
- Se sugiere realizar estudios sobre la naturaleza y distribución de los precipitados, con el objeto de abundar más en el conocimiento del efecto que éstos tienen en los tratamientos térmicos particulares a que se sometieron las muestras.
- Las condiciones en servicio a que se someten este tipo de aleaciones hace necesario conocer el comportamiento del material en lo referente a fatiga térmica, a la relajación de esfuerzos, así como su respuesta ante ambientes agresivos.

LISTA DE TABLAS

| TABLA | DESCRIPCION | PAGINA |
|--------------|--|---------------|
| 2.1 | Velocidades de deformación en los ensayos mecánicos | 32 |
| 3.1 | Propiedades del aluminio | 84 |
| 3.2 | Aleaciones de aluminio para trabajo mecánico | 84 |
| 3.3 | Otras clasificaciones de las aleaciones de aluminio | 85-86 |
| 3.4 | Composición de algunas aleaciones Al-Si para fundición | 87 |
| 3.5 | Características de algunas aleaciones Al-Si para fundición | 87 |
| 3.6 | Variación de la temperatura eutéctica en algunas aleaciones de aluminio | 88 |
| 4.1 | Composición química de la aleación modificada | 112 |
| 4.2 | Composición química de la aleación modificada y refinada | 112 |
| 5.1 | Exponente de endurecimiento por deformación y coeficiente de resistencia en las aleaciones modificada y refinada | 127 |

LISTA DE FIGURAS

| FIGURA | DESCRIPCION | PAGINA |
|--------|--|--------|
| 2.1 | Curva ingenieril esfuerzo-deformación | 33 |
| 2.2 | Curvas esfuerzo-deformación para aceros de alta y baja tenacidad | 34 |
| 2.3 | Curva de fluencia esfuerzo-deformación verdaderos | 34 |
| 2.4 | Geometría de la estricción | 35 |
| 2.5 | Comparación de curvas esfuerzo-deformación real e ingenieril | 35 |
| 2.6 | Gráfica esfuerzo-deformación en escala log-log | 36 |
| 2.7 | Variación en la resistencia con la velocidad de deformación en el cobre a distintas temperaturas | 36 |
| 2.8 | Variación en la curva esfuerzo-deformación con la temperatura | 37 |
| 2.9 | Efecto de la temperatura sobre la resistencia de algunos materiales | 37 |
| 2.10 | Curvas esfuerzo-deformación que muestran el envejecimiento por deformación en aceros | 38 |
| 2.11 | Efecto Portevin-LeChatelier en hierro | 38 |
| 2.12 | Deformación en muestras sometidas a compresión | 39 |
| 2.13 | Efecto de la fricción en la apariencia de las muestras sometidas a compresión axial | 39 |
| 2.14 | Zonas de deformación en muestras cilíndricas sometidas a compresión | 40 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.15 | Medición de la deformación en muestras cilíndricas para compresión | 40 |
| 2.16 | Muestra sometida a compresión y su simulación por computadora | 41 |
| 2.17 | Efecto “cáscara de naranja” en una aleación de aluminio | 41 |
| 2.18 | Grietas por corte en una muestra de acero en compresión | 42 |
| 2.19 | Probetas para compresión con reborde y cónicas | 42 |
| 2.20 | Deformación en la superficie libre de una muestra sometida a compresión | 43 |
| 2.21 | Curva de fluencia que muestra el ablandamiento plástico del material | 43 |
| 2.22 | Formación de bandas de corte durante la compresión | 44 |
| 3.1 | Celda electrolítica para la producción de aluminio | 89 |
| 3.2 | Microestructuras de las aleaciones de aluminio | 90 |
| 3.3 | Diagrama de fases binario Al-Si | 91 |
| 3.4 | Diagrama de fases pseudo binario Al-Mg ₂ Si | 91 |
| 3.5 | Microestructuras de la aleación de aluminio 413 | 92 |
| 3.6 | Propiedades mecánicas en función del espaciamiento dendrítico en una aleación de aluminio | 93 |
| 3.7 | Variación de la conductividad eléctrica en función del espaciamiento dendrítico | 93 |
| 3.8 | Principales características microestructurales | 94 |
| 3.9 | Propiedades mecánicas en función del tamaño de grano para una aleación Al-4.5%Cu | 94 |
| 3.10 | Distribución de la porosidad en una aleación Al-4.5%Cu | 95 |
| 3.11 | Diagrama de fases Al-Ti | 96 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3.12 | Refinamiento de grano en la aleación A356 | 96 |
| 3.13 | Características de una curva de enfriamiento | 97 |
| 3.14 | Tamaño de grano promedio en función de $\Delta\theta$ para las aleaciones 319 y 356 | 98 |
| 3.15 | Estructura de la aleación eutéctica Al-Si sin modificar | 99 |
| 3.16 | Estructura de la aleación eutéctica Al-Si modificada | 99 |
| 3.17 | Zonas eutécticas en las curvas de enfriamiento en aleaciones modificada y no modificada | 100 |
| 3.18 | Nivel de modificación y temperatura del eutéctico en una aleación A356 | 100 |
| 3.19 | Porosidad por contracción y por gas en una pieza vaciada | 101 |
| 3.20 | Diagrama de fases binario Al-Cu | 101 |
| 3.21 | Dureza en función del tiempo para distintas temperaturas de envejecimiento | 102 |
| 4.1 | Microestructura de la aleación modificada mostrando las estructuras dendrítica y eutéctica | 113 |
| 4.2 | Microestructura de la aleación modificada y refinada mostrando las estructuras dendrítica y eutéctica | 114 |
| 4.3 | Tamaño de grano en la aleación modificada y refinada | 115 |
| 4.4 | Tamaño de grano en la estructura modificada | 115 |
| 4.5 | Curva de enfriamiento de una aleación de aluminio tipo 319 | 116 |
| 4.6 | Curvas de calentamiento y enfriamiento para los tratamientos térmicos de solubilizado | 117 |
| 4.7 | Curvas de calentamiento para los tratamientos T6 y T7 | 118 |
| 4.8 | Penetrador de diamante piramidal para el ensayo de dureza Vickers | 119 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.9 | Probetas en condición de solubilizado y estabilizado (T7) después de la compresión | 120 |
| 4.10 | Probetas en condición de máxima dureza (T6) después de la compresión | 121 |
| 5.1 | Dureza Vickers encontrada en la aleación modificada y refinada | 128 |
| 5.2 | Dureza Vickers encontrada en la aleación modificada | 128 |
| 5.3 | Curvas de fluencia en la aleación modificada en condición T4 | 129 |
| 5.4 | Curvas de fluencia en la aleación modificada en condición T6 | 130 |
| 5.5 | Curvas de fluencia en la aleación modificada en condición T7 | 131 |
| 5.6 | Curvas de fluencia en la aleación modificada y refinada en condición T4 | 132 |
| 5.7 | Curvas de fluencia en la aleación modificada y refinada en condición T6 | 133 |
| 5.8 | Curvas de fluencia en la aleación modificada y refinada en condición T7 | 134 |
| 5.9 | Curvas de fluencia para la aleación modificada a una velocidad inicial de deformación de 0.046 s^{-1} | 135 |
| 5.10 | Curvas de fluencia para la aleación modificada a una velocidad inicial de deformación de 0.0046 s^{-1} | 136 |
| 5.11 | Curvas de fluencia para la aleación modificada a una velocidad inicial de deformación de 0.00046 s^{-1} | 137 |
| 5.12 | Curvas de fluencia para la aleación modificada y refinada a una velocidad inicial de deformación de 0.00046 s^{-1} | 138 |
| 5.13 | Curvas de fluencia para la aleación modificada y refinada a una velocidad inicial de deformación de 0.0046 s^{-1} | 139 |
| 5.14 | Curvas de fluencia para la aleación modificada y refinada a una velocidad inicial de deformación de 0.046 s^{-1} | 140 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.15 | Resistencia mecánica en la aleación modificada a una velocidad inicial de deformación de 0.00046 s^{-1} | 141 |
| 5.16 | Resistencia mecánica en la aleación modificada a una velocidad inicial de deformación de 0.0046 s^{-1} | 142 |
| 5.17 | Resistencia mecánica en la aleación modificada a una velocidad inicial de deformación de 0.046 s^{-1} | 143 |
| 5.18 | Resistencia mecánica en la aleación modificada y refinada a una velocidad inicial de deformación de 0.00046 s^{-1} | 144 |
| 5.19 | Resistencia mecánica en la aleación modificada y refinada a una velocidad inicial de deformación de 0.0046 s^{-1} | 145 |
| 5.20 | Resistencia mecánica en la aleación modificada y refinada a una velocidad inicial de deformación de 0.046 s^{-1} | 146 |
| 5.21 | Curva de endurecimiento y criterio de Considère para la aleación modificada y con solubilizado a $400 \text{ }^\circ\text{C}$ | 147 |
| 5.22 | Curva de endurecimiento y criterio de Considère para la aleación modificada y con solubilizado a $440 \text{ }^\circ\text{C}$ | 148 |
| 5.23 | Curva de endurecimiento y criterio de Considère para la aleación modificada y con solubilizado a $480 \text{ }^\circ\text{C}$ | 149 |
| 5.24 | Curva de endurecimiento y criterio de Considère para la aleación modificada y refinada con solubilizado a $400 \text{ }^\circ\text{C}$ | 150 |
| 5.25 | Curva de endurecimiento y criterio de Considère para la aleación modificada y refinada con solubilizado a $440 \text{ }^\circ\text{C}$ | 151 |
| 5.26 | Curva de endurecimiento y criterio de Considère para la aleación modificada y refinada con solubilizado a $480 \text{ }^\circ\text{C}$ | 152 |
| 5.27 | Deformación plástica uniforme en la aleación modificada a una velocidad inicial de deformación de 0.00046 s^{-1} | 153 |
| 5.28 | Deformación plástica uniforme en la aleación modificada a una velocidad inicial de deformación de 0.0046 s^{-1} | 154 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.29 | Deformación plástica uniforme en la aleación modificada a una velocidad inicial de deformación de 0.046 s^{-1} | 154 |
| 5.30 | Deformación plástica uniforme en la aleación modificada y refinada a una velocidad inicial de deformación de 0.00046 s^{-1} | 156 |
| 5.31 | Deformación plástica uniforme en la aleación modificada y refinada a una velocidad inicial de deformación de 0.0046 s^{-1} | 157 |
| 5.32 | Deformación plástica uniforme en la aleación modificada y refinada a una velocidad inicial de deformación de 0.046 s^{-1} | 158 |
| 5.33 | Esfuerzo contra velocidad de deformación en la aleación modificada, en condición T4 | 159 |
| 5.34 | Sensibilidad a la velocidad de deformación en la aleación modificada, en condición T4 | 159 |
| 5.35 | Esfuerzo contra velocidad de deformación en la aleación modificada, en condición T6 | 160 |
| 5.36 | Sensibilidad a la velocidad de deformación en la aleación modificada, en condición T6 | 160 |
| 5.37 | Esfuerzo contra velocidad de deformación en la aleación modificada, en condición T7 | 161 |
| 5.38 | Sensibilidad a la velocidad de deformación en la aleación modificada, en condición T7 | 161 |
| 5.39 | Esfuerzo contra velocidad de deformación en la aleación modificada y refinada, en condición T4 | 162 |
| 5.40 | Sensibilidad a la velocidad de deformación en la aleación modificada y refinada, en condición T4 | 162 |
| 5.41 | Esfuerzo contra velocidad de deformación en la aleación modificada y refinada, en condición T6 | 163 |
| 5.42 | Sensibilidad a la velocidad de deformación en la aleación modificada y refinada, en condición T6 | 163 |
| 5.43 | Esfuerzo contra velocidad de deformación en la aleación modificada y refinada, en condición T7 | 164 |

| | | |
|------|--|---------|
| 5.44 | Sensibilidad a la velocidad de deformación en la aleación modificada y refinada, en condición T7 | 164 |
| 5.45 | Curvas de fluencia log-log en la aleación modificada | 165-166 |
| 5.46 | Curvas de fluencia log-log- en la aleación modificada y refinada | 167 |
| 6.1 | Curva de dureza máxima para aluminio envejecido | 180 |

RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

César Gerardo Dimas Acevedo

Candidato al Grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería
Mecánica con Especialidad en Materiales

Tesis

“Efecto de la Temperatura de Solubilización sobre las Propiedades Mecánicas en una Aleación Al-Si Tipo A319”

El Ing. César Gerardo Dimas Acevedo nació en la ciudad de Monterrey Nuevo León el 17 de Octubre de 1960. Es hijo del Sr. Adán Dimas Guerra y la Sra. Esthela Acevedo Ortega. Realizó sus estudios de licenciatura en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, obteniendo el título de Ingeniero Mecánico Electricista en Octubre de 1982. En el año de 1986 obtiene el título de Instructor de Lengua Inglesa en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, para posteriormente realizar estudios de Traductor e Intérprete de Conferencias en el mismo Instituto.

En el año de 1982 ingresa a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL, desarrollando labores docentes para el Departamento de Mecánica de Materiales. En Agosto de 1996 ingresó al programa de graduados en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica para realizar estudios de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales como becario del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

