Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Civil Mecánica

COMPORTAMIENTO SUPERELÁSTICO DE UNA ALEACIÓN Cu-11,8%pAl-0,5%pBe EN ENSAYOS DE TRACCIÓN CÍCLICOS BAJO CONDICIONES TIPO SÍSMICAS

Memorista

Giovanni González Banda

Comisión Examinadora

Profesor Guía: *Aquiles H. Sepúlveda Osses*

Profesor Co-Guia: *María O. Moroni Yadlin*

Profesor Integrante: *Eduardo A. Donoso Catalán*

Enero de 2007
Santiago de Chile

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: GIOVANNI F. GONZÁLEZ B.
FECHA: 10 DE JULIO DE 2007
PROF. GUÍA: SR. AQUILES H. SEPÚLVEDA O.

COMPORTAMIENTO SUPERELÁSTICO DE UNA ALEACIÓN Cu-11,8%pAl-0,5%pBe EN ENSAYOS DE TRACCIÓN CÍCLICOS BAJO CONDICIONES TIPO SÍSMICAS

En el presente tema de Memoria se estudió el comportamiento mecánico de una aleación superelástica Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be, dentro del rango de temperatura y frecuencia propias de un fenómeno sísmico (0,1 a 5 [Hz]; -20 a + 50 [ºC]). Para esto, se realizaron ensayos de tracción de tipo tradicional (monotónicos) y cíclico.

Este trabajo es parte de una línea de investigación relacionada con la caracterización de materiales, particularmente de materiales *Superelásticos*, pertenecientes a las aleaciones con *Memoria de Forma*, que puedan servir para la fabricación de dispositivos de disipación de energía sísmica en estructuras civiles. Las características relevantes de los materiales superelásticos, es que ellos presentan, en ciclos de carga-descarga, valores relativamente importantes de deformaciones recuperables y de energía disipada por ciclo. Este comportamiento se relaciona con la transformación de fase Austenita-Martensita.

Para esta memoria se contó con una aleación CuAlBe, fabricada por Trefimétaux, bajo la forma de barras de 3 [mm] de diámetro; ensayos preliminares a temperatura ambiente indican que este material es superelástico.

Los parámetros considerados en los ensayos son los siguientes: *Tamaño de Grano Austenítico* (64, 95 y 250 [μm]); *Frecuencia* (0.1 y 1 [Hz]); *Amplitud de Deformación* de los ensayos cíclicos (hasta 4% aprox.); y *Temperatura del ensayo* (20 y 50 [ºC]).

El comportamiento del material se caracterizó bajo los términos siguientes:

- En ensayos de tracción uniaxial se caracterizaron algunas propiedades mecánicas del material (Módulo Elástico, Esfuerzos de Fluencia, Esfuerzo Máximo y de Rotura, Deformación Máxima, Ductilidad).
- En ensayos de tracción cíclicos, se determinó: el esfuerzo y la deformación asociados a la máxima deformación superelástica alcanzable; los esfuerzos asociados al inicio de las transformaciones martensíticas directa e inversa; módulo elástico de la austenita; módulo secante; y coeficiente de amortiguamiento.

Finalmente, los resultados se discutieron en la perspectiva de las relaciones microestructura-propiedades pertinentes y de la aplicación considerada.

INDICE

1.- INTRODUCCIÓN *7*

1.1.- ANTECEDENTES GENERALES **7**

1.2.- OBJETIVOS **8**

2.- ANTECEDENTES *9*

2.1.- INTRODUCCIÓN **9**

2.2.- FUNDAMENTOS METALÚRGICOS GENERALES **9**

2.2.1.- Recocido 9

2.2.1.1.- Tratamiento Térmico: Recocido 9

2.2.1.2.- Recuperación 10

2.2.1.3.- Recristalización 10

2.2.1.4.- Crecimiento de grano 12

2.2.2.- Ley de crecimiento de grano 12

2.2.3.- Crecimiento del Tamaño de Grano en aleaciones base Cobre 13

2.2.4.- Creep [10] 14

2.2.4.1.- Comportamiento Clásico del Creep 14

2.2.4.2.- Mecanismos de Deformación a Altas Temperaturas 17

2.3.- ALEACIONES SMA **19**

2.3.1.- Características Generales 19

2.3.2.- Transformación Martensítica: Visión Microscópica 22

2.3.2.1.- Las Transformaciones por difusión 22

2.3.2.2.- Las Transformaciones por Desplazamiento 22

2.3.2.3.- Deformación de la red cristalina: 23

2.3.2.4.- Cizalladura invariante de la red: 24

2.3.3.- Transformación Martensítica: Visión Macroscópica 26

2.3.4.- Martensita inducida por Esfuerzo y asociada a la Superelasticidad 28

2.4.- RESULTADOS OBTENIDOS POR AUTORES **33**

2.4.1.- S. Montecinos, M. O. Moroni y A. Sepúlveda. 33

2.4.2.- Muñoz, R. 2004 [3] 34

2.4.3.- Monsalve, A. 1990 36

2.4.4.- Saldivia, R. A. 2000 36

2.4.5.- Adasme, 2001 37

3.- TRABAJO REALIZADO *38*

3.1.- METODOLOGÍA GENERAL **38**

3.1.2.- Material 38

3.1.3.- Dimensión de las Probetas 38

3.1.4.- Variables en los ensayos de tracción 38

3.1.5.- Tipos de ensayos 39

3.1.6.- Ensayos complementarios 39

3.2.- METODOLOGÍA ESPECÍFICA **40**

3.2.1.- Obtención de datos ideales: 40

3.2.2.- Obtención de datos reales: 40

3.2.3.- Variación del tamaño de grano: 40

3.2.4.- Obtención de datos experimentales con ensayos monotónicos: 40

3.2.5.- Obtención de datos experimentales con ensayos cíclicos: 40

3.2.6.- Estudio de Resultados: 41

3.3.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL **42**

3.3.1.- Introducción 42

3.3.1.1.- 1^{era} Etapa: 42

3.3.1.2.- 2da Etapa: 43

3.3.1.3.- 3^{era} Etapa: 43

3.3.2.- Variación del Tamaño de Grano: 43

3.3.2.1.- Introducción 43

3.3.2.2.- Tratamiento Térmico 44

3.3.2.3.- Fabricación de Muestras en Bakelita: 45
3.3.2.4.- Proceso de Pulido: 46
3.3.2.5.- Ataque químico: 46
3.3.2.6.- Fotografías de las Microestructuras 46
3.3.2.7.- Cálculo del Tamaño de Grano: 47
3.3.3.- Ensayos de Tracción Monotónica: 51
3.3.3.1.- Procedimiento para el montaje: 51
3.3.3.2.- Obtención de Resultados: 52
3.3.4.- Ensayos Cíclicos: 53
3.3.4.1.- Procedimiento para el montaje: 53
3.3.4.2.- Regulación Temperatura de Ensayo 54
3.3.4.3.- Obtención de resultados: 57
3.3.4.4.- Gráfico de resultados: 59

4.- RESULTADOS ***....60***

4.1.- VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO 60
4.1.1.- Resultado 60

4.2.- ENSAYOS DE TRACCIÓN MONOTÓNICA 62
4.2.1.- Resultados 62
4.2.1.1.- Gráficos Ensayos de Tracción Monotónicos a Temperatura Ambiente (T=T1=20 [ºC] aprox.) y Temperatura Alta (T=T2=50 [ºC] aprox.) 62
4.2.1.2.- Gráficos Ensayos de Tracción Monotónicos para los tres Tamaños de Grano (d1 = 64,5 [μm], d2 = 95,2 [μm] y d3 = 250 [μm]) 62
4.2.1.3.- Propiedades Mecánicas 65

4.3.- ENSAYOS CÍCLICOS 67
4.3.1.- Resultado: Variación de la Amplitud de Deformación, 10 ciclos 67
4.3.1.1.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Media y Tamaño de Grano Fino 68
4.3.1.2.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Media y Tamaño de Grano Medio 70
4.3.1.3.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Media (T=T1=20 [ºC] aprox.) y Tamaño de Grano Grueso (d=d3) 72
4.3.1.4.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Alta y Tamaño de Grano Fino 75
4.3.1.5.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Alta y Tamaño de Grano Medio 78
4.3.1.6.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Alta (T=T2=50 [ºC] aprox.) y Tamaño de Grano Grueso (d=d3) 81
(*) Discusión 83
4.3.2.- Resultado: Deformación Relativa de los ciclos de deformación para 10 ciclos. 85
4.3.2.1.- Deformaciones I, II y III para Ensayos Cíclicos a Deformación Creciente 86
4.3.2.2.- Gráficos de Deformaciones I, II y III para Ensayos Cíclicos a Deformación Creciente 88
4.3.2.3.- Límite Inferior del Límite Superelástico 92
4.3.2.4.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Media (T1) y Alta (T2), y Tamaño de Grano (d1), Fino (d2), Medio y Grueso (d3) 94
4.3.2.5.- Conclusión 95
4.3.3.- Resultado: Curva envolvente 96
4.3.3.1.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Media y Alta, Tamaño de Grano Fino, Medio y Grueso 96
4.3.3.2.- Envolvente – Tracción a Temperatura Media y Alta, Tamaño de Grano Fino, Medio y Grueso 99
4.3.4.- Resultado: Variación de la Frecuencia de Oscilación. 104
4.3.5.- Resultado: Variación de la Amplitud de Deformación en 100 y 10 ciclos. 105
4.3.5.1.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Media (T=T1=20 [ºC] aprox.) y Tamaño de Grano Fino (d1) 105
4.3.5.2.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Media (T=T1=20 [ºC] aprox.) y Tamaño de Grano Medio (d2) 106
4.3.6.- Resultado: Comportamiento de los Esfuerzos Máximos 108
4.3.6.1.- Influencia del número de Ciclos en el comportamiento de los Esfuerzos Máximos. 108
4.3.6.2.- Influencia del número de Ciclos en el comportamiento de las Deformaciones asociadas 109
4.3.7.- Energía Disipada en ensayos Cíclicos 110
4.3.7.1.- Tabla de resultados a Temperatura Ambiente y Alta, Tamaño de Grano Fino, Medio y Grueso. 110
Discusión 113
4.3.7.2.- Gráficos Módulo Secante 114
4.3.7.2.1.- Módulo Secante en función de la Deformación para los distintos Tamaños de Grano. 114
4.3.7.2.2.- Módulo Secante en función de la Deformación para las temperaturas de Ensayo 116

4.3.7.3.- Gráficos Coeficiente de Amortiguamiento 118
4.3.7.3.1.- Temperatura Media (T=T1=20 [ºC] aprox.)....118
4.3.7.3.2.- Temperatura Alta (T=T2=50 [ºC] aprox.)....120
4.3.7.4.- Gráficos Energía Disipada 122
4.3.7.4.1.- Temperatura Media (T=T1=20 [ºC] aprox.)....122
4.3.7.4.2.- Temperatura Alta (T=T2=50 [ºC] aprox.)....124
4.3.7.5.- Influencia del Tamaño de Grano en el Factor de Amortiguamiento β1 126
4.3.7.6.- Influencia del Tamaño de Grano en el Factor de Amortiguamiento β2 127
4.3.7.7.- Influencia del Tamaño de Grano en el Factor de Amortiguamiento β3 128
4.3.7.8.- Influencia de la Temperatura de Ensayo en el Factor de Amortiguamiento β1 129
4.3.7.9.- Influencia de la Temperatura de Ensayo en el Factor de Amortiguamiento β2 131
4.3.7.10.- Influencia de la Temperatura de Ensayo en el Factor de Amortiguamiento β3 133
4.3.7.11.- Influencia de la Temperatura de Ensayo en el Módulo Secante 135
4.3.7.12.- Influencia del Tamaño de Grano en el Módulo Secante 137
4.3.7.13.- Influencia del Tamaño de Grano en la Energía Disipada....138
4.3.7.14.- Influencia de la Temperatura de Ensayo en la Energía Disipada....139

5.- DISCUSIÓN 141

5.1.- CONTROL POR DESPLAZAMENTO DEL CABEZAL 141

5.2.- ENSAYO MONOTÓNICO 141

5.3.- ENSAYO CÍCLICO 142
Tamaño de Grano y Amplitud de Deformación....142
Frecuencia de Oscilación en 10 ciclos 143
Frecuencia de Oscilación en 100 ciclos 144
Curva Envolvente 144
Energía....144

6.- CONCLUSIONES 145

6.1.- VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO 145

6.2.- ENSAYOS MONOTÓNICOS 145
Ensayos Realizados....145
Influencia de la Temperatura en el Comportamiento Mecánico 146
Influencia del Tamaño de Grano en el Comportamiento Mecánico....146

6.3.- ENSAYOS CÍCLICOS.... 147
Influencia de la Amplitud de Deformación en el Comportamiento Superelástico....147
Influencia de la Temperatura en el Comportamiento Superelástico 147
Influencia del Tamaño de Grano en el Comportamiento Superelástico....147
Influencia de la Frecuencia de Oscilación en el Comportamiento Superelástico....148
Influencia del Número de Ciclos en el Comportamiento Superelástico....148
Parámetros de Comportamiento Cíclico 148

REFERENCIAS 149

ANEXO A 151

Ensayos Monotónicos 151

Ensayos Cíclicos: Variación de la Amplitud de Deformación 153

Ensayos Cíclicos: Variación de la Frecuencia de Oscilación 167

Ensayos Cíclicos: Variación de la Frecuencia de Oscilación en 100 ciclos 169

ANEXO B 171

Programa Utilizado para los Ensayos Cíclicos y Monotónicos.... 171

ANEXO C 175

Planilla usada para los Ensayos Cíclicos y Monotónicos esxperimentales 175

ANEXO D 177

Resultados obtenidos del Software MATLAB para el Cálculo de Factores de Amortiguamiento, Energía Disipada, Módulo de Young y Módulo Secante.... 177

D.1.- Resultados Disipación de Energía para la Temperatura de Ensayo Media (Ambiente).....177
D.1.1.- Resultados Disipación de Energía para Tamaño de Grano Fino.....177
D.1.2.- Resultados Disipación de Energía para Tamaño de Grano Medio.....181
D.1.3.- Resultados Disipación de Energía para Tamaño de Grano Grueso.....185
D.2.- Resultados Disipación de Energía para la Temperatura de Ensayo Alta 191
D.2.1.- Resultados Disipación de Energía para Tamaño de Grano Fino.....191
D.2.2.- Resultados Disipación de Energía para Tamaño de Grano Medio.....197
D.2.3.- Resultados Disipación de Energía para Tamaño de Grano Grueso.....201

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- ANTECEDENTES GENERALES

En el presente tema de memoria se estudió el comportamiento mecánico de la aleación Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be, la cual es del tipo superelástico, según se ha verificado en ensayos experimentales a temperatura ambiente. Para este trabajo se tuvo en perspectiva la potencial aplicación de este material en dispositivos de absorción de energía sísmica en construcciones civiles. Ello en atención a que las aleaciones superelásticas presentan valores relativamente altos de *Deformación Elástica Máxima* y *Amortiguamiento*, en ciclos de carga y descarga. Para este estudio se dispuso de barras de la referida aleación de 3 [mm] de diámetro, producidas por Trefimetaux.

El ***Efecto Superelástico*** (SE) es uno de los dos efectos que pueden presentar las denominadas aleaciones con *Memoria de Forma* (SMA, *Shape Memory Alloy*). El otro es el *Efecto de Memoria de Forma* (SME). El que en ciertos materiales se manifieste uno u otro efecto, ambos relacionados con la *Transformación Martensítica*, depende de la temperatura de trabajo.

La ***Transformación Martensítica*** es una transformación al estado sólido sin difusión, en la cual los átomos se mueven cooperativamente por mecanismos de corte, donde los desplazamientos que experimentan los átomos son fracciones del parámetro de la celda. La fase matriz (fase de alta temperatura o austenita) es de estructura cúbica, por ende, de alta simetría, en tanto que la martensita (fase de baja temperatura) presenta una muy baja simetría. En un ciclo superelástico (de carga-descarga) el material vuelve a la misma forma externa inicial, debido a que cada grano de austenita se recupera casi totalmente, incluyendo sus características de tamaño, forma y orientación cristalina. Esta forma se relaciona estrechamente con la diferente simetría de las fases involucradas en la transformación; en efecto, cuando corresponde que ocurra la transformación reversible de las diferentes variantes de martensita provenientes de un único grano austenítico original (al inicio del ciclo), la solución cristalina austenítica final (al final del ciclo) es única y corresponde a la misma estructura cristalina austenítica inicial. (Nótese que, en principio, en este ciclo no se han dado fenómenos irreversibles de deformación, como lo son aquellos asociados a deformación plástica por dislocaciones).

Así, en el SE un aumento en el esfuerzo produce una deformación que induce la transformación de austenita en martensítica; se tiene, entonces, una transformación martensítica inducida por esfuerzo. Cuando este esfuerzo es removido, ocurre la transformación reversible de la martensita en austenita y el material recupera su estructura original (en el sentido antes expuesto) y, por tanto, su forma original. Todo esto dentro de ciertos límites de esfuerzo y deformación.

1.2.- OBJETIVOS

El Objetivo de este estudio sobre una aleación Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be es:

- Caracterizar el *Comportamiento Superelástico* en ensayos de *Tracción Cíclicos* a diferentes temperaturas (20 y 50 [ºC]) y frecuencias (0,1 y 1 [Hz])
- Caracterizar el *Comportamiento Mecánico* del material en ensayos Clásicos de Tracción a temperaturas (20 y 50 [ºC]).

2.- ANTECEDENTES

2.1.- INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describirán los antecedentes teóricos relacionado con el presente tema de memoria. Dichos antecedentes son fundamentales para entender el comportamiento superelástico de la aleación en estudio (Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be), además del efecto de los tratamientos térmicos sobre la microestructura, y por ende, sobre el comportamiento mecánico. La información se clasificó en:

- Fundamentos Metalúrgicos Generales, particularmente relacionado con el tratamiento térmico usado a nivel metalúrgico.

- Descripción de las Aleaciones con Memoria de Forma (Shape Memory Alloy, SMA).

- Resultados de trabajos sobre la referida aleación CuAlBe superelástica en la Universidad de Chile.

2.2.- FUNDAMENTOS METALÚRGICOS GENERALES

2.2.1.- Recocido

2.2.1.1.- Tratamiento Térmico: Recocido

Para variar el *Tamaño de Grano* en la aleación Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be se usó un Tratamiento Térmico (TT), llamado *Recocido*. A continuación se define y explica en qué consiste dicho TT y cómo afecta a nivel granular al material.

El Recocido se define como un Tratamiento Térmico en el cual la probeta se calienta desde una temperatura T_1 hasta una temperatura T_2, donde $T_1 < T_2$, por un tiempo determinado. En general, este proceso se realiza luego de que el material ha sido sometido a deformación en frío (por ejemplo un laminado o trefilado).

Dependiendo de la deformación previa impuesta, lo que controla la densidad de dislocaciones presente, en el proceso de Recocido se pueden manifestar tres transformaciones:

- Recuperación
- Recristalización
- Crecimiento de Grano

En todos los casos, la fuerza motriz se relaciona con la disminución de los efectos metaestables en el material inicial.

2.2.1.2.- Recuperación

Este proceso se debe a la cancelación de distintos signos y al reordenamiento de las dislocaciones remanentes en subgranos o límites de celdas. En algunos casos este proceso se produce incluso durante la deformación plástica en caliente del material, lo que se conoce con el nombre de Recuperación Dinámica.

En este periodo, las propiedades físicas y mecánicas afectadas por el trabajo en frío previo se recuperan. Esta recuperación decrece con el tiempo, en un principio es alta, sin embargo, a medida que el tiempo avanza, la fuerza impulsora que desencadena la reacción disminuye.

2.2.1.3.- Recristalización

Este proceso se define como la Nucleación y Crecimiento de granos nuevos (recristalizados) esencialmente libres de deformación (dislocaciones) a expensas de otros muy deformados debido a la deformación plástica.

Una característica importante de este proceso es la Nucleación y Crecimiento. A diferencia de la Recuperación, este proceso comienza en forma lenta hasta llegar a una velocidad de reacción máxima, después de la cual decae.

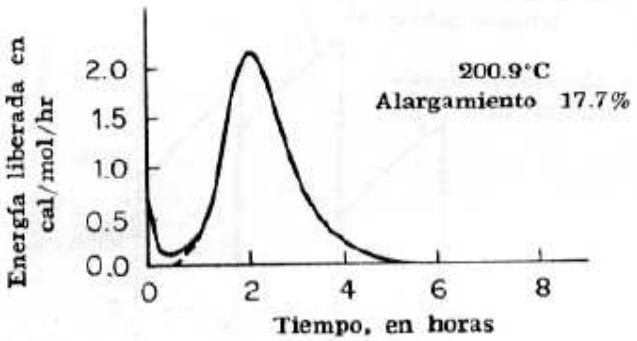


Figura N°1

Recuperación y Recristalización ocurrido secuencialmente en un material deformado previamente en frío en forma severa *[Reed Hill, 1973]*

En la Figura Nº1, se muestra el comportamiento de la Energía liberada en función del tiempo en un proceso isotérmico. En este comportamiento, se puede diferenciar los fenómenos de Recuperación y el de Recristalización. El primero se caracteriza por un decaimiento en la liberación de energía (pendiente negativa), y el segundo por una gran liberación de energía, luego de un comienzo lento.

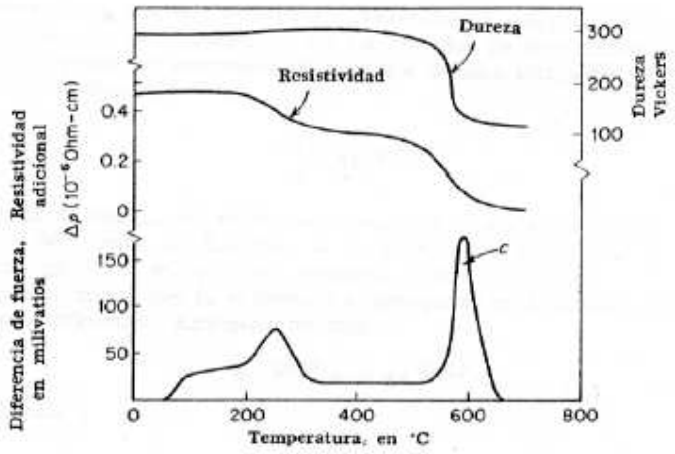


Figura N°2

Recuperación [Reed Hill, 1973]

En la Figura Nº2 se muestra la variación en la diferencia de Fuerza, Resistividad y Dureza con respecto a la Temperatura, y la Recuperación de las Propiedades Mecánicas con el Tratamiento Térmico de Recocido. El punto "c" indica el comienzo de la Recristalización. Por otro lado, la dureza se recupera antes del comienzo de la Recristalización y la Resistividad se recupera en forma simultánea con el inicio de la Recristalización.

La Recristalización es promovida con el aumento del trabajo en frío, pero el Tamaño de Grano Recristalizado se define como el tamaño de grano presente en la aleación en el momento que finaliza el proceso de Recristalización. Este tamaño decrece a medida que aumenta la deformación, pero es necesaria una deformación mínima para que se produzca la Recristalización, mas conocida como cantidad crítica de trabajo en frío.

2.2.1.4.- Crecimiento de grano

Una vez que el metal se encuentra completamente Recristalizado se entiende que la fuerza impulsora para el crecimiento de grano se almacena en la energía de superficie de los límites de grano. Como el crecimiento de grano produce una disminución de energía de superficie, la energía impulsora disminuye durante el proceso.

2.2.2.- Ley de crecimiento de grano

El término "Tamaño de Grano" se refiere al promedio del diámetro de grano de un grupo de granos de un cristal. Para medirlo existen diversos métodos, como "La Línea Interceptada", el cual se consideró para determinar el tamaño de grano obtenido del tratamiento térmico en cuestión.

La ley de crecimiento de tamaño de grano se define como:

$$D^n - D_o^n = K * t \qquad (1)$$

Donde "D" es el tamaño de grano promedio, "D_o" es el tamaño de grano inicial (finalizada la Recristalización), "t" el tiempo y "K" es una constante a una temperatura dada. El exponente "n" depende del mecanismo de difusión involucrado en el crecimiento y para materiales monofásicos usualmente se tiene n = 2.

En la Figura Nº3 se muestra el gráfico de la ecuación (1). En dicha Figura se observa cómo al disminuir la energía de superficie disminuye la energía que activa el proceso, hasta un máximo dado, en el caso de alambres, cuando el tamaño de grano se acerca al orden de magnitud del diámetro del alambre.

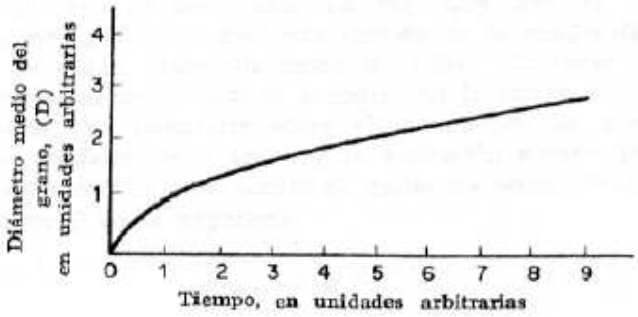


Figura N°3

Representación gráfica de la Ley de Crecimiento de Grano [Reed Hill, 1973]

Si se considera que el proceso de crecimiento de grano es un proceso activado, se puede considerar que la constante "K" depende exponencialmente de la temperatura y de la energía de activación involucrada. Esto se puede escribir como la ecuación siguiente:

$$K = K_o * e^{-(Q/RT)} \tag{2}$$

Reemplazando la relación o ecuación (2) en la relación (1), se obtiene lo siguiente:

$$D^n - D_o^n = K_o * t * e^{-(Q/RT)} \tag{3}$$

Lo importante de esta relación es que se puede determinar la energía de activación "Q" que gobierna el proceso de crecimiento de grano en una aleación determinada.

2.2.3.- Crecimiento del Tamaño de Grano en aleaciones base Cobre

La importancia del crecimiento del Tamaño de Grano radica en la dependencia de las propiedades, en particular de las Mecánicas. En aplicaciones de materiales estructurales a bajas temperaturas, generalmente se prefiere un tamaño de grano fino para optimizar la Resistencia y la Tenacidad. Sin embargo, se requiere un tamaño de grano Grueso para mejorar la resistencia al creep[1] a alta temperatura.

Las Aleaciones Austeníticas, con Memoria de Forma basadas en Cu, son conocidas por su crecimiento de tamaño de grano excesivo cuando son tratadas térmicamente a temperaturas correspondientes a la región monofásica de la fase β. Es deseable un

[1] El término de creep o fluencia lenta será explicado en el capítulo siguiente para su mejor entendimiento.

refinamiento del Tamaño de Grano como requerimiento de las propiedades mecánicas y esto puede lograrse por la adición de elementos adecuados de refinación y por la aplicación de tratamientos termomecánicos adecuados.

El Tamaño de Grano produce cambios en las temperaturas de transformación y en la transformación martensítica inducida por esfuerzo. Lo ideal es evitar tamaños de grano gruesos, esto dado que decrece la uniformidad y reproducibilidad de las propiedades, además pueden producir fragilidad seudo-elástica debido a los altos esfuerzos de coMPactibilización entre los granos vecinos, lo cual lleva a fracturas intergranulares y a la disminución de la resistencia a la corrosión bajo tensión.

2.2.4.- Creep [10]

2.2.4.1.- Comportamiento Clásico del Creep

Ensayo de Creep:

Consiste en un ensayo de tracción o compresión de una muestra bajo carga constante. La extensión o alargamiento, en el caso de ensayos en tracción, es medida en función del tiempo “t”. La temperatura “T” debe ser exhaustivamente controlada durante el ensayo.

Etapas del Creep:

En la Figura Nº4 se muestra una curva típica de un ensayo de Creep (de manera de mostrar más claramente las distintas etapas, en la absisa las zonas primarias y terciarias fueron exageradas):

Figura N°4

"Deformación v/s Comportamiento Mecánico de Creep"

A continuación, se realiza un análisis de las etapas expuestas en la Figura anterior:

***Creep Primario**:* Generalmente representa menos del 1 [%] de la suma de las deformaciones de las zonas elásticas, en estado estacionario y terciarias. La deformación es producida por el movimiento de las dislocaciones no ancladas en la matriz. La velocidad de deformación disminuye en el tiempo gracias al trabamiento de estas dislocaciones en movimiento. El grado de deformación logrado en esta zona depende fuertemente de la densidad de dislocaciones presentes inicialmente en la muestra.

***Creep en Estado Estacionario**:* La disminución de la velocidad de deformación provocada por el trabamiento de dislocaciones (endurecimiento) es equilibrada en la medida que el material se recupera. La mayor parte de la vida útil del material corresponde a la permanencia en esta etapa (es la que más perdura). Por esto, es importante destacar los mecanismos de deformación existentes en esta etapa.

Dependiendo de la temperatura de ensayo actuarán diferentes mecanismos de Creep: si se está entre 0.3 y 0.7 de la temperatura de fusión, es el ascenso de dislocaciones el que opera. Si la temperatura es mayor aún, será el Creep Difusional el que será relevante. Este último ocurre gracias al deslizamiento de bordes de grano planteado en "*Mecanismo de deslizamiento de borde de grano*"[2]. Existen dos mecanismos propuestos a modo de explicación:

[2] Capítulo 2.5.4.2.- "*Mecanismos de Deformación a Altas Temperaturas*", item a.- "*Mecanismo de deslizamiento de borde de grano*"

- *Coble*. Plantea que los átomos difundirán por los límites de grano, puesto que en ellos hay una mayor concentración de vacancias. Ello indica que la energía de activación térmica para la difusión será menor en estas zonas, facilitando el movimiento del límite de grano.

- *Herring y Navarro*. Plantea que la difusión atómica ocurre por el interior del volumen del grano, pese a la mayor energía de activación térmica necesaria.

Así, es posible afirmar que si el tamaño de grano es menor, el creep difusional se verá facilitado. Contrariamente, se observa que en materiales endurecidos por dispersión esto no ocurre. Más aún, a menor tamaño de grano estas aleaciones presentan mayor resistencia a la deformación a elevadas temperaturas. Según Rösler et al el mecanismo controlante es la separación térmicamente activada de dislocaciones en los límites de grano, después de ascender sobre el dispersoide. Además, Sauer plantea que con la cantidad apropiada de dispersoides semicoherentes con la matriz, es posible dificultar la movilidad de los bordes de grano, complicando su deslizamiento.

A grandes rasgos, el Creep en estado estacionario depende principalmente de la temperatura y del esfuerzo. La ley general que modela este comportamiento es:

$$\dot{\varepsilon}_{EE} = A * \sigma^{n_{ap}} * e^{-(Q_{ap}/RT)} \tag{4}$$

Donde:

$\dot{\varepsilon}_{EE}$: Velocidad de deformación en el estado estacionario

A : Constante que depende del material

σ : Esfuerzo de saturación

n_{ap} : Exponente de esfuerzo aparente

Q_{ap} : Energía de activación aparente para Creep

R : Constante universal de los gases

T : Temperatura del ensayo

Para metales puros y algunas aleaciones, según los modelos clásicos, el exponente del esfuerzo aparente varía entre 3 y 5 para Creep por ascenso de dislocaciones, y 1 para

Creep Difusional (mayor temperatura). Si el material es endurecido por dispersión n_{ap} y Q_{ap} se espera que sean grandes.

***Creep terciario**:* El material se ablanda producto de la Recristalización y Sobreenvejecimiento, generado por el largo tiempo transcurrido que ha permitido la recuperación del material. Si el material es endurecido por dispersión esto se ve dificultado, pues las dislocaciones se ven impedidas de lograr la Poligonización, que es fundamental para la Recristalización. La fractura ocurre, posiblemente por la formación de microhuecos, causados por el deslizamiento de los bordes de grano.

2.2.4.2.- Mecanismos de Deformación a Altas Temperaturas

Los Mecanismos de Deformación de un material son los siguientes:

a.- *Mecanismo de deslizamiento de borde de grano*: Controla el Creep difusional. Las vacancias ubicadas en zonas de tracción de los bordes de grano, difunden a las zonas de compresión, alargando los granos según la dirección de tracción.

b.- *Corte de partículas*: una dislocación puede superar la dificultad presentada por la interacción con una partícula, deslizando a través de ella. Para que esto sea posible, la partícula debe ser coherente con la matriz, y con un tamaño menor a 10 [nm].

c.- *Mecanismo de Orowan*: Cuando una dislocación encuentra una partícula lo suficientemente incoherente, se arquea en torno a ella para poder superarla. Tras la dislocación queda, valga la redundancia, un anillo de dislocación rodeando la partícula. Generalmente, se acepta que es este el mecanismo predominante a bajas temperaturas en aleaciones endurecidas por dispersión. A temperaturas mayores su efectividad aún está en discusión.

d.- *Ascenso de dislocaciones de borde*: Opera a elevadas temperaturas. La línea de la dislocación asciende localmente, gracias a la difusión de vacancias en la interface matriz-dispersoide, pudiendo así superar el impedimento generado por los dispersoides.

e.- *Mecanismo de dificultad de separación de la dislocación con la partícula*: Dado que la dislocación relaja su campo de deformaciones en la interface matriz-

dispersoide, se requiere un mayor esfuerzo para separar la dislocación de la partícula. Si los dispersoides son incoherentes este mecanismo se ve favorecido.

Como se puede ver, sólo el primer mecanismo está relacionado con el deslizamiento de los bordes de grano, y el resto con la forma en que las dislocaciones pueden separar partículas.

Así, se comprende que si se dificulta cada uno de estos mecanismos de separación de partículas, por parte de las dislocaciones, y se impide el deslizamiento de límites de grano, la resistencia a la deformación plástica del material, a altas temperaturas, se verá favorecida. Por lo tanto, es necesario, para cada matriz, incorporar la cantidad adecuada y tipos de dispersoides que logren este objetivo.

2.3.- ALEACIONES SMA

2.3.1.- Características Generales

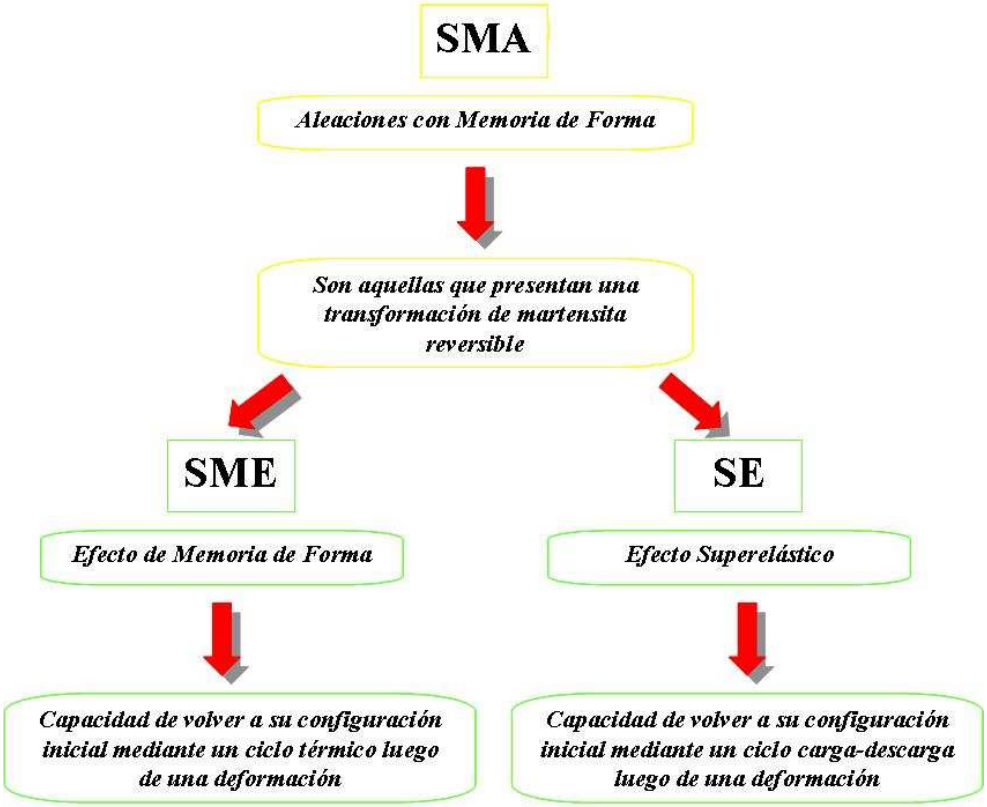


Figura N°5

Esquema de las aleaciones con Memoria de Forma [3]

Como puede verse en el esquema de la Figura Nº5, las aleaciones con Memoria de Forma son aquellas que presentan una Transformación Martensítica Reversible. En estas aleaciones, existen dos tipos de efectos: ***Memoria de Forma*** (SME) y ***Superelasticidad*** (SE). SME se refiere a la capacidad de volver a su configuración original por ciclos térmicos luego de una deformación plástica; SE se refiere a la capacidad de volver a su configuración original por ciclos de carga-descarga luego de una deformación plástica [3].

El origen de la propiedad de superelasticidad presentada por la aleación Cu-Al-Be se debe a la Transformación Martensítica (MT) [2].

La Transformación martensítica es una transformación de fase de primer orden sin difusión en el estado sólido. La nueva fase, denominada martensita, se forma por procesos

de nucleación y crecimiento. Una condición necesaria para que la transformación martensítica tenga lugar es que aumente la estabilidad termodinámica. Entender este tipo de transformación es esencial para comprender el comportamiento tanto de las aleaciones con SME y SE. Para esto, se tienen dos visiones de tal transformación: micro y macroscópica:

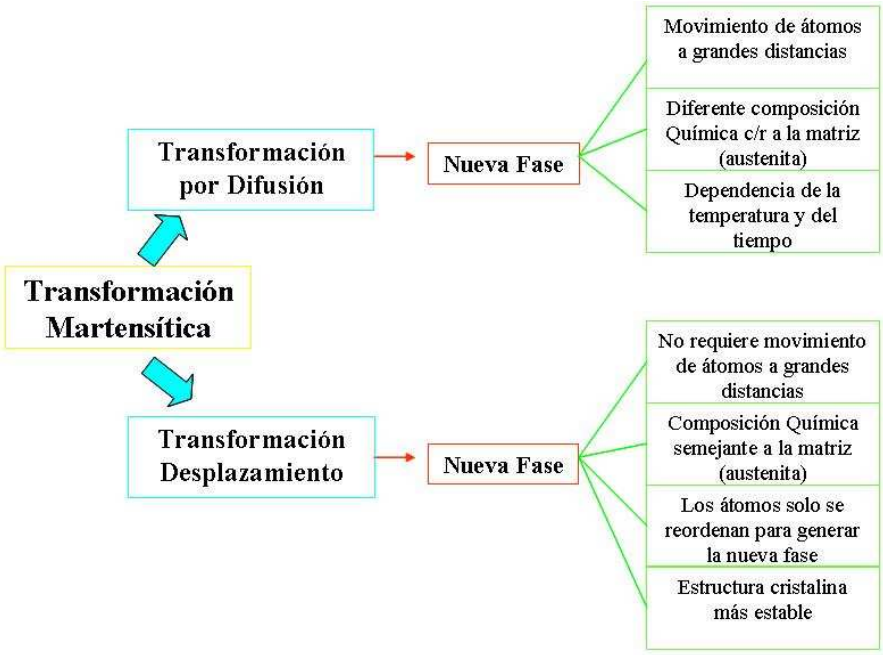


Figura N°6

Esquema de la Transformación Martensítica [7]

SME es un efecto propio de aleaciones tales que a pesar de la baja temperatura de fase, al deformarse por aplicación de cargas, el material es capaz de recobrar su forma original por la transformación reversible de la martensita calentando el material a una temperatura crítica, llamada "Temperatura de Transformación Reversible". Este efecto fue encontrado en la aleación Au-47,5 at% Cd por Chang and Read, citados en el texto.

Montecinos et al [1], estudió el comportamiento superelástico y la capacidad de amortiguamiento de las aleaciones en cuestión (Cu-Al-Be, con probetas de 3 y 5,6 [mm] de diámetro), donde se concluyó que la aleación presenta interesantes propiedades.

De la publicación antes mencionadas, se destaca lo siguiente:

- A mayor [%] de Be en la aleación, menor es la temperatura de comienzo de la transformación martensítica (Ms).

- Los resultados microestructurales de la aleación mostraron la presencia de austenita y propiedades superelásticas de las aleaciones Cu-Al-Be tratadas. Además, se concluyó que la aleación Cu-11,8 wt %Al-0,5% wt %Be presenta un comportamiento superelástico aceptable bajo condiciones sísmicas, dicho efecto se muestra hasta una deformación del 2,3 [%] a la cual se obtiene un amortiguamiento equivalente del 4 [%].

- La propiedad de superelasticidad está asociada a una gran deformación recuperable o reversible no lineal con cargas y descargas. Sin embargo, esto ocurre bajo ciertas condiciones de temperatura y esfuerzo o carga aplicada. Un aumento en la carga aplicada induce gradualmente en la austenita considerables esfuerzos asociados a la transformación martensítica.

Cabe señalar que no todas las aleaciones de Cu-Al-Be poseen un efecto superelástico. En la Figura Nº7 se muestra el diagrama ternario de composiciones, en este se puede indicar que para el polígono ACEFA, se obtiene un comportamiento superelástico, pero dentro de este conjunto se reconocen mejores resultados para las aleaciones comprendidas en el polígono BCDGHB. Los elementos aleantes son fundamentales debido a que estos hacen variar algunas propiedades del material e influir en el comportamiento superelástico. La adición de Be logra una disminución del tamaño de grano; además, el Be influye directamente en la disminución de la temperatura Ms.

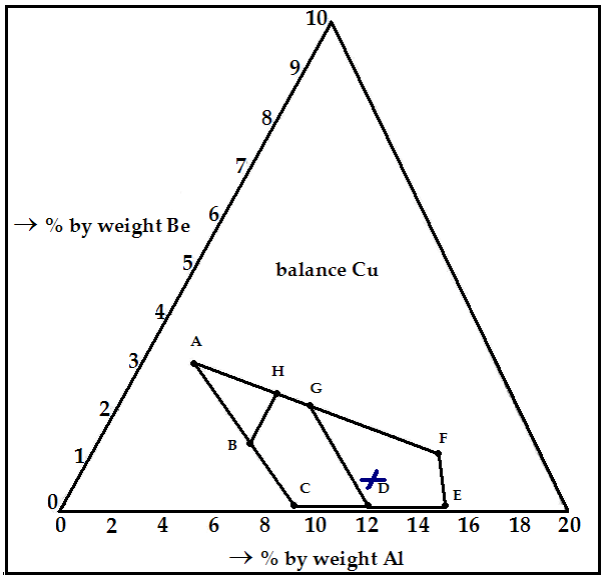


Figura N°7

Sistema Ternario Cu-Al-Be

2.3.2.- Transformación Martensítica: Visión Microscópica

Las transformaciones de estados de los materiales sólidos ocurren de dos formas: *Difusión y Desplazamiento* (Figura Nº6):

2.3.2.1.- Las Transformaciones por difusión

Son aquellas en que una nueva fase se forma sólo por el movimiento de átomos aleatoriamente a distancias grandes. Dado que la nueva fase es de diferente composición química que la matriz, se necesita un amplio rango de difusión. Debido a la migración atómica, la temperatura y el tiempo son factores importantes en el proceso.

2.3.2.2.- Las Transformaciones por Desplazamiento

No requieren amplio rango de movimiento. En este caso, los átomos se reordenan para llegar a una nueva estructura cristalina más estable, pero sin cambiar la naturaleza química de la matriz. Como no es necesaria una migración atómica, el proceso se puede considerar independiente del tiempo, además el movimiento de la interfaz entre las fases es muy rápida, limitada sólo por la velocidad del sonido. Generalmente, se les llama

transformaciones atérmicas, dado que la fase nueva depende de la temperatura y no de la cantidad de tiempo a la que está a esa temperatura.

Las Transformaciones Martensíticas son generalmente de Desplazamiento, y se forman enfriando desde una fase a alta temperatura, llamada Fase Madre o Austenita. Además, estas transformaciones son independientes de la difusión, que se produce de modo instantáneo y mantiene una relación de orientación entre la fase madre y la martensítica.

Desde el punto de vista cristalográfico, la transformación de austenita a martensita puede explicarse en dos partes: *Deformación de la red cristalina y Cizalladura invariante de la red:*

2.3.2.3.- Deformación de la red cristalina:

Consiste en un movimiento de todos los átomos necesarios para producir la nueva estructura a partir de la antigua. En la siguiente Figura se muestra la progresión de transformación de la austenita a la martensita:

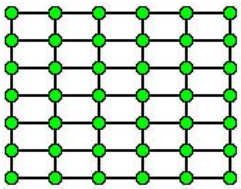


Figura N°8

100 [%] Austenita

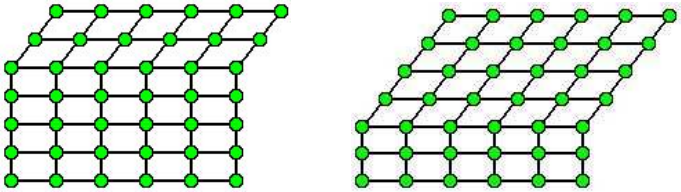


Figura N°9

Transición de Austenita a Martensita

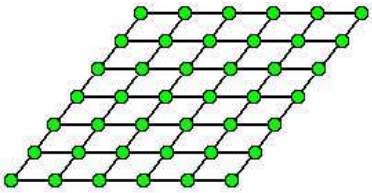


Figura N°10

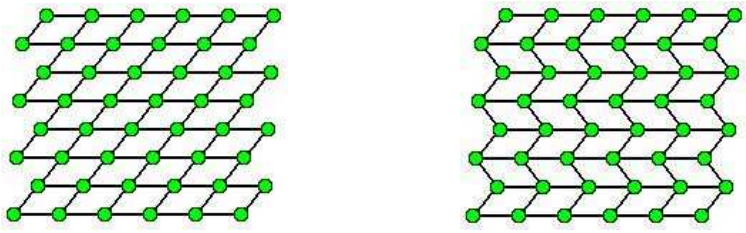
100 [%] Martensita

Como se puede observar, cada plano de átomos se desplaza una pequeña distancia, y el resultado final de estos pequeños movimientos coordinados es la nueva estructura martensítica.

2.3.2.4.- Cizalladura invariante de la red:

Esta parte de la transformación martensítica es un paso de acomodación, pues la estructura martensítica formada en el paso anterior (Deformación de la red cristalina) es de forma y volumen diferente que la austenita circundante.

Dado lo anterior, tanto la forma como la austenita circundante deben ser alteradas para acomodarse a una nueva estructura, por lo cual existen dos formas o mecanismos para hacerlo: *Deslizamiento o Maclado* (Figura Nº11).



(a) Mecanismo de Deslizamiento *(b) Mecanismo de Maclado*

Figura N°11

Notar que en la Figura anterior, ambas celdas tienen la nueva estructura martensítica pero la forma en conjunto es la de la austenita original.

El deslizamiento es un proceso permanente y común en la mayoría de la martensita, el maclado en cambio, es incapaz de acomodar cambios de volumen, pero puede acomodar cambios de forma en un modo reversible. Ahora bien, para que el efecto de memoria de forma ocurra, la acomodación debe ser totalmente reversible, o que es lo mismo, el mecanismo de maclado debe predominar en la transformación martensítica.

En la Figura Nº11a, se puede observar que el mecanismo de Deslizamiento produce daños irreversibles en la estructura, mientras que en la Figura Nº11b, el mecanismo de Maclado es sólo una acomodación reversible, pero no se pueden alcanzar cambios de volumen importantes.

En las siguientes Figuras, se observa el cambio de forma debido a la MT (Figura Nº12) y los dos tipos de acomodación para dicha transformación (Figura Nº 13 y 14).

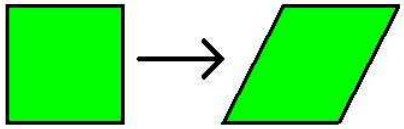


Figura N°12

Cambio de forma debido a la Transformación Martensítca (MT)

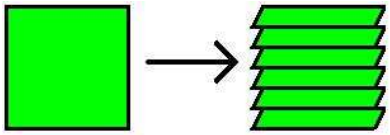


Figura N°13

Acomodación de la Deformación por Mecanismo de Deslizamiento

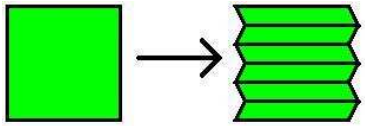


Figura N°14

Acomodación de la Deformación por Mecanismo de Maclado

En cuanto a la energía Libre de Gibbs, en la Figura Nº15 se puede observar que bajo T_0 la formación de martensita (M_S) es más estable, mientras que cuando la Temperatura es mayor que T_0 la austenita es más estable (debido a que G^p es menor).

T_0 es la temperatura en la cual, existe equilibrio termodinámico.

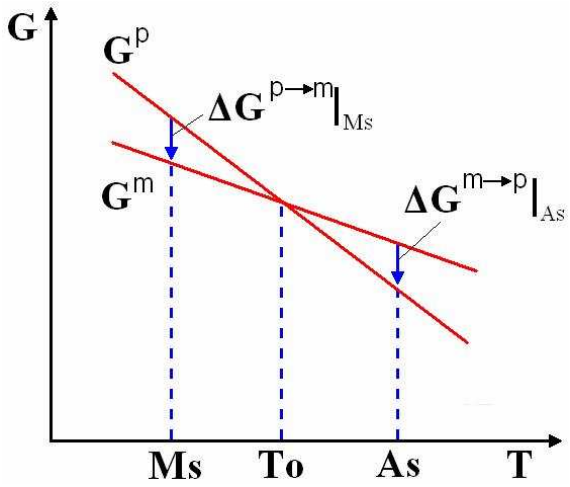


Figura N°15

Energía Libre de Gibbs en función de la Temperatura [2]

2.3.3.- Transformación Martensítica: Visión Macroscópica

Desde esta perspectiva, las características de la austenita y de la martensita son distintas y varían con la temperatura. En la Figura Nº16 se puede observar un diagrama que muestra la variación de algunas propiedades en función de la temperatura:

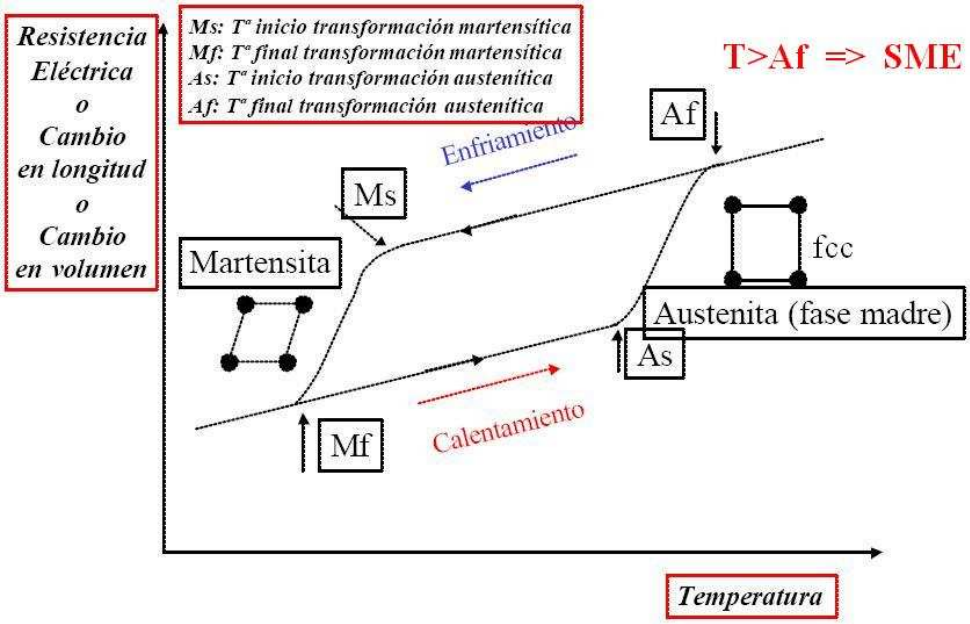


Figura N°16

Resistencia Eléctrica, Cambio en la Longitud y Cambio en el Volumen en función de la Temperatura para la Martensita y Austenita [3]

Donde:

M_S : Temperatura de comienzo de la Transformación Martensítica.

M_f : Temperatura de término de la Transformación Martensítica.

A_S : Temperatura de comienzo de la Transformación Austenítica.

A_f : Temperatura de término de la Transformación Austenítica.

A estas temperaturas se les suele llamar Temperaturas Características o Temperaturas de Transformación. Se pueden observar 2 procesos: Enfriamiento y Calentamiento. Ambos procesos se describen a continuación:

En el proceso de *Enfriamiento* M_S es la primera temperatura que aparece, punto desde el cual empieza a formarse la martensita. Esta transformación termina cuando la temperatura desciende hasta M_f.

En el proceso de *Calentamiento*, la primera temperatura que se presenta es A_S, punto desde el cual comienza la transformación martensítica para terminar en A_f. Cuando la aleación alcanza A_S comienza la formación de una estructura cristalina cúbica centrada en las caras (ccf), caracterizada por su rigidez y dureza, terminando el proceso en T = A_f. Cuando la aleación se calienta más allá de A_f, la deformación se recupera completamente obteniendo el Efecto Memoria de Forma (SME).

Además, de la Figura Nº16 se puede ver que ambos caminos de los procesos (enfriamiento y calentamiento) son distintos como consecuencia de la histéresis de transformación.

Los límites impuestos por las temperaturas de Transformación se pueden observar en la siguiente Figura:

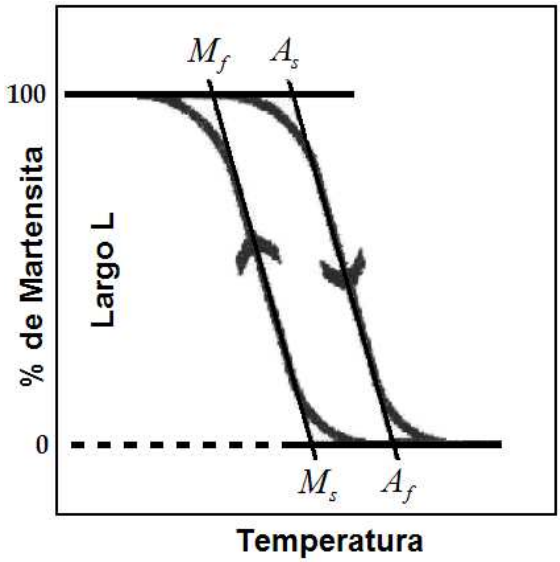


Figura N°17

"Concentración de Martensita en función de la Temperatura"

2.3.4.- Martensita inducida por Esfuerzo y asociada a la Superelasticidad

Como se argumentó en el punto anterior, el efecto de forma se produce de dos maneras, Térmica y Mecánica:

- Térmica, porque la martensita se forma inicialmente enfriando y deformando por debajo de M_f y luego calentando por encima de A_f para recuperar la forma. Así, SME es causado por calentamiento.

- Mecánica, porque la formación de la martensita es un proceso termoplástico, lo que quiere decir que un descenso incremental de la temperatura entre M_S y M_f produce un ligero crecimiento de las láminas de martensita existentes y la nucleación de algunas nuevas, pero cuando la temperatura asciende, las nuevas láminas nucleadas desaparecen y aquellas que crecieron ligeramente en el enfriamiento, se reducen un poco.

Así, un decrecimiento de la temperatura es equivalente a un crecimiento de la tensión, ambas estabilizando la martensita.

La martensita puede formarse en T = M_S bajo ninguna tensión, sin embargo, la martensita también se puede formar a T > M_S si se le aplica una tensión, por lo que la martensita formada se le llama *Martensita Inducida por Tensión* (SIM).

En la Figura Nº18 se muestra una curva de esfuerzo v/s deformación ideal para un material superelástico.

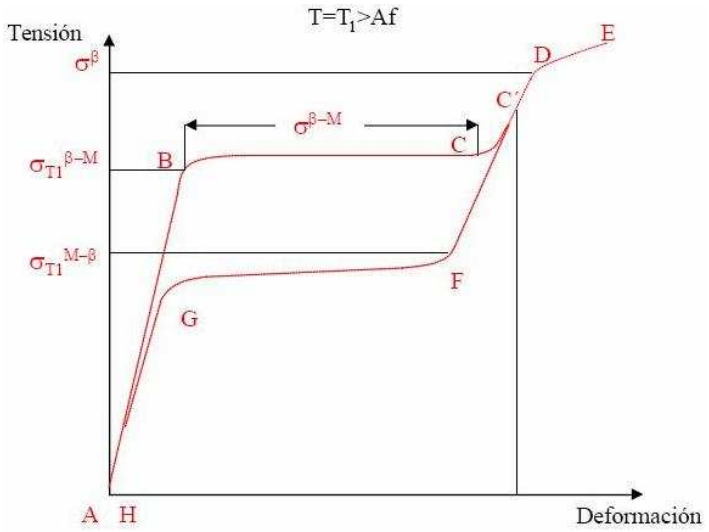


Figura N°18

Curva Esfuerzo-Deformación ideal de un material superelástico [7]

Donde, para T = T_1, $\sigma_{T_1}^{\beta \to M}$ corresponde al valor del esfuerzo donde comienza la Transformación de Austenita a Martensítica, $\sigma_{T_1}^{M \to \beta}$ corresponde al valor del esfuerzo donde comienza la Transformación de Martensita a Austenita, σ^{β} corresponde al valor del esfuerzo donde comienza el rango plástico del material de composición 100 [%] martensita.

El ciclo de carga y descarga representado en la Figura Nº18 se describe a continuación:

A-B : Deformación elástica de la fase original.
B-C : Transformación Austenita a Martensita.
C-D : Deformación elástica con 100% Martensita.
D : Límite elástico de la Martensita.
C'-F : Recuperación elástica.
F-G : Transformación Martensita a Austenita.

G-H : Recuperación elástica.

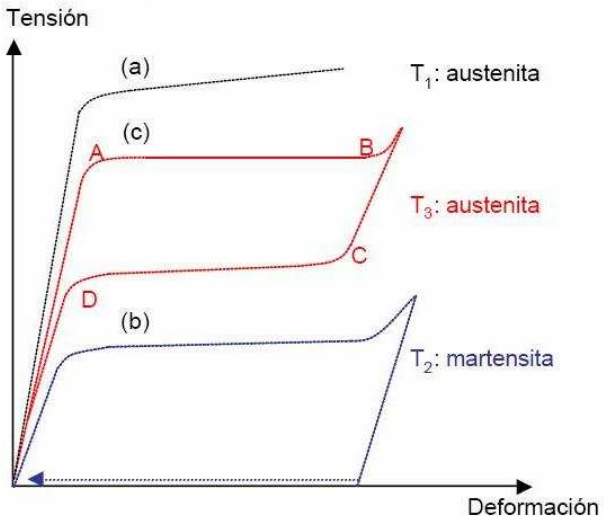


Figura N°19

Curva de Esfuerzo-Deformación de las aleaciones SMA a diferentes Temperaturas [2]

En la Figura Nº19, se muestra el comportamiento ideal de una aleación a diferentes temperaturas: T_1, T_2 y T_3, donde:

$$T_1 > M_d > T_3 > A_f > M_S > T_2$$

M_d es la temperatura por encima de la cuál la tensión crítica para inducir martensita es mayor que la necesaria para mover las dislocaciones, por lo que M_d es la temperatura más alta a la cual es posible obtener martensita. Así, la temperatura para el SIM cae en la intervalo [M_S, M_d].

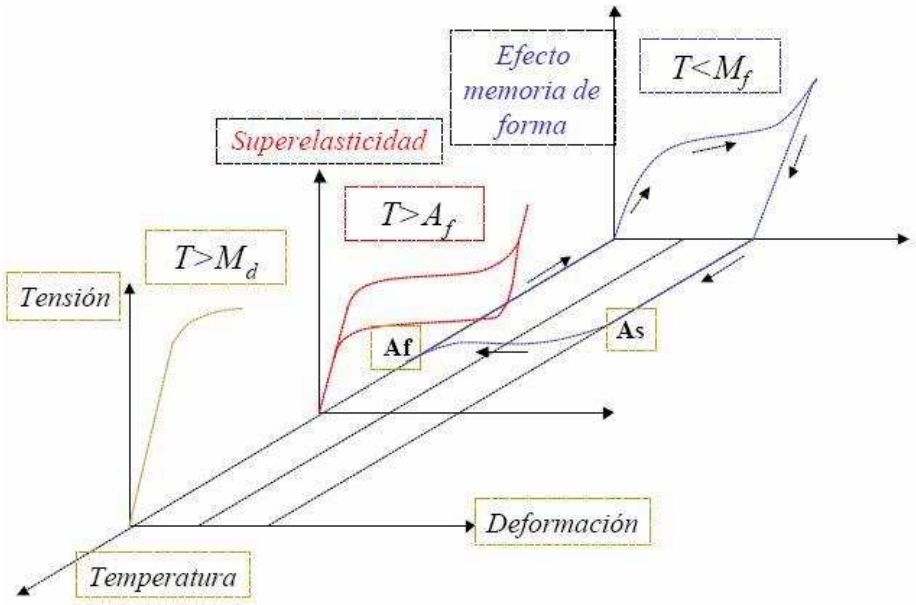


Figura N°20

Curva de Esfuerzo-Deformación de las aleaciones SMA a diferentes Temperaturas en 3-D [2]

Las Figuras Nº19 y 20 muestran el comportamiento mecánico de una aleación a distintas temperaturas. En la curva (a) de la Figura Nº19 y amarilla en la Figura Nº20, la temperatura es:

$$T = T_1$$

Donde

$$T_1 > M_d > A_f > M_S,$$

por lo que el comportamiento es similar a la de cualquier aleación, un rango elástico hasta un esfuerzo de fluencia, seguido de un rango plástico, para llegar a una tensión máxima y rotura. En la curva (b) y azul de las Figuras Nº19 y 20 respectivamente, la temperatura es:

$$T = T_2$$

Donde

$$M_d > A_f > M_S > T_2,$$

Por lo que el comportamiento es de Efecto de Memoria de Forma, donde con un ciclo térmico se logra recobrar la forma original de la aleación. En la curva (c) y roja de las Figuras Nº19 y 20 respectivamente, la temperatura es:

$$T = T_3$$

Donde

$$M_d > T_3 > A_f > M_S ,$$

Así, el comportamiento es superelástico.

2.4.- RESULTADOS OBTENIDOS POR AUTORES

2.4.1.- S. Montecinos, M. O. Moroni y A. Sepúlveda.

Se estudiaron dos tipos de aleaciones, A y B, con distintas concentraciones de Berilio para ambos casos. En esta publicación se señala la dependencia entre la concentración de Berilio y la Temperatura de comienzo de la Transformación martensítica:

- A mayor %Be, menor M_S.

Las características de cada experiencia se señalan a continuación:

1.- Aleación A: Cu-12,8%p.Al-0,6%p.Be.

Características de los ensayos:

a.- Diámetro de la probeta: 15 [mm].
b.- Tratamiento térmico: 700 [ºC], 30 [min], enfriado en agua.
c.- Tamaño de grano 0,45 [mm]
d.- A_S = -110 [ºC]
e.- Esfuerzos máximos 400, 450 y 500 [MPa], con 1, 1.5 y 1.8 [%] de deformación.
f.- Frecuencia entre 0,1 y 2 [Hz]

2.- Aleación B: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be.

Características de los ensayos:

a.- Diámetro de las probetas: 5.6 [mm].
b.- Tamaño de grano: 0,4 [mm].
c.- Temperaturas de Transformación:

M_S = -5 [ºC]

M_f = -47 [ºC]

A_S = -20 [ºC]

A_f = 2 [ºC]

d.- Frecuencia 1 [Hz], Variación del esfuerzo, produciendo distintas deformaciones.
e.- Deformación entre 0,1 y 3,4 [%]

2.4.2.- Muñoz, R. 2004 [3].

En la tesis de Muñoz se estudió la aleación: Cu-11,8wt.%Al-0,5wt.%Be

Cuyas características son:

a.- Probetas de 3,5 y 15 [mm] de diámetro y 8 [mm] de longitud.
b.- Recocido a 850 y 900 [ºC] respectivamente, entre 25 y 120 [seg]. Templado en agua.

Uno de los propósitos fue estudiarel aumento del tamaño de grano, para esto, se utilizó el tratamiento térmico: Recocido, entre 850 [ºC] y 900 [ºC] de temperatura durante 120 [s].

A continuación se muestran fotografías del crecimiento de grano a 850 [ºC].

Figura N°21
Tamaño de grano inicial 57 [μm] [3]

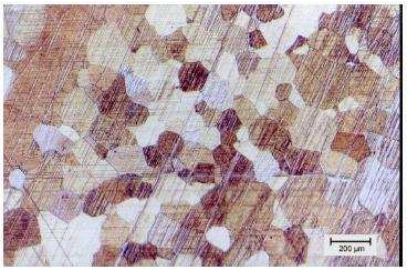


Figura N°22
Tiempo = 30 [s]

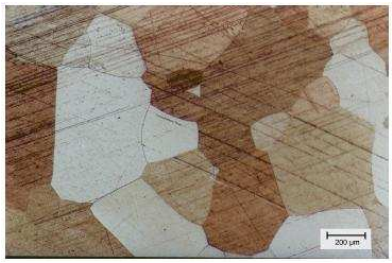


Figura N°23
Tiempo = 40 [s]

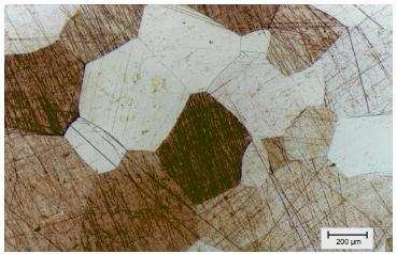


Figura N°24
Tiempo = 60 [s]

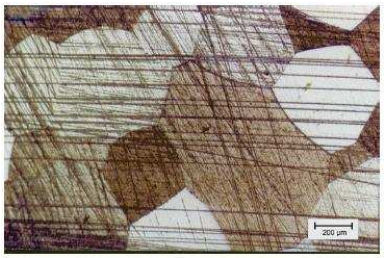


Figura N°25
Tiempo = 80 [s]

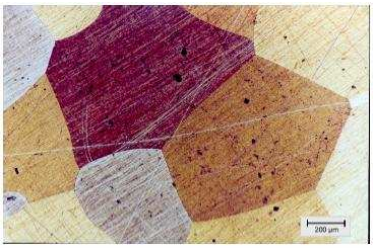


Figura N°26
Tamaño de grano final 635 [μm],
Tiempo = 120 [s]

2.4.3.- Monsalve, A. 1990

Monsalve utilizó la siguiente aleación:

Cu-Zn-Al: Cu-20,36wt.%Zn-5,20wt.%Al-0,04wt%B.

Cuyas características son:

- Largo 40 [mm], ancho 6 [mm], espesor 1,3 [mm].
- Tratamiento térmico: 770 [ºC] por 30 [min].
- Se agregó Boro (0,04 [%] en peso) y Titanio (0,07-0,1 [%] en peso) para afinar el tamaño de grano y mejorar las propiedades mecánicas de la probetas en ángulo de 100º como unidad de medida para cuantificar la memoria de forma.

2.4.4.- Saldivia, R. A. 2000

Saldivia usó la siguiente aleación:

Cu-Al-Zn-Ni: Cu-27,0wt.%Zn-3,70wt.%Al-1,5wt%Ni.

- Diámetro 5 [mm].
- Tratamiento térmico: 840 [ºC] por 15 [min], templado en agua y envejecido a 100 [ºC] por 1 [hr]. 20 ciclos de tracción-compresión con frecuencia 0.1, 0.5, 1 [Hz] hasta 3,5% de deformación.
- Tamaño de grano 0,3 a 0,8 [mm].
- Esfuerzo máximo: 450 [MPa] para un 3,5 [%] de deformación.
- Compresión máxima: 350 [MPa] para 0,5 [%] de deformación.

2.4.5.- Adasme, 2001

La aleación superelástica trabajada por Adasme es Cu-Al-Be: Cu-12,8wt.%Al-0,6wt%Be.

Cuyas características son las siguientes:

- Diámetro 1,4 (alambre) y 15 (barra) [mm].
- Largo 75 [mm] total, y 35 [mm] efectivo.
- Tratamiento térmico:

  Templado: 700 [ºC] por 30 [min] (alambre) y 650 [ºC] por 15 [min] (barra)
- Ciclos sinusoidales de tracción, compresión y tracción-compresión a diferentes amplitudes, frecuencias y deformación. Ensayo con probetas tratadas y no tratadas térmicamente.
- Tensión máxima de tracción fue de 500 [MPa], para una deformación de 4,4 [%] a 0,1 [Hz] y 1,76 [%] a 2 [Hz].

3.- TRABAJO REALIZADO

3.1.- METODOLOGÍA GENERAL

3.1.2.- Material

El material superelástico que se ha usado en los ensayos para determinar su comportamiento mecánico es:

- 87,7 [%p.] Cu - 11,8 [%p.] Al - 0,5 [%p.] Be

3.1.3.- Dimensión de las Probetas

Las dimensiones de las probetas se especifican a continuación:

- Diámetro: 3 [mm].
- Longitud útil: 30 [mm].
- Longitud de la probeta: 70 [mm].

3.1.4.- Variables en los ensayos de tracción

Los factores o parámetros bajo los cuales se estudió el comportamiento superelástico de la aleación son los siguientes:

- Tamaño de grano, d.
- Frecuencia de los ensayos cíclicos, ν.
- Amplitud de deformación en ensayos cíclicos, A.
- Temperatura de ensayo, T.

3.1.5.- Tipos de ensayos

Se realizaron dos tipos de ensayos:

- Ensayos de tracción monotónica. Variables: d y T.
- Ensayos de tracción cíclicos. Variables: d, ν, A y T.

Para cada caso, se analizaron las propiedades mecánicas del material.

3.1.6.- Ensayos complementarios

Como trabajo complementario, se realizaron los siguientes análisis:

- Verificación de la composición de la aleación.
- Determinación de las temperaturas de transformación por Calorimetría Diferencial de Barrido.
- Eventualmente, análisis fractográfico de las probetas fracturadas en ensayos monotónicos.

3.2.- METODOLOGÍA ESPECÍFICA

3.2.1.- Obtención de datos ideales:

Se estudió el comportamiento de la aleación bajo condiciones sísmicas. Para esto, se recurrió al análisis bibliográfico, lugar donde se puede estudiar el comportamiento ideal-teórico de una aleación superelástica.

3.2.2.- Obtención de datos reales:

Por medio de los ensayos monotónicos y cíclicos, se estudió el comportamiento mecánico de la aleación Cu-Al-Be. Para esto se varió una serie de parámetros ya descritos.

3.2.3.- Variación del tamaño de grano:

Uno de los parámetros en estudio es la dependencia de las propiedades mecánicas de la aleación superelástica con respecto al tamaño de grano. Para esto, se hizo un tratamiento térmico: Recocido, entre 700 y 750 [ºC] de temperatura durante 120 segundos aproximadamente.

3.2.4.- Obtención de datos experimentales con ensayos monotónicos:

Con este tipo de ensayo se obtuvieron las propiedades mecánicas básicas del material, como módulo de Young, Esfuerzo de Fluencia, Esfuerzo máximo, Ductilidad, Esfuerzo de Rotura, Deformación máxima. Estas propiedades se determinaron con el gráfico Esfuerzo-Deformación de cada ensayo.

3.2.5.- Obtención de datos experimentales con ensayos cíclicos:

Con este tipo de ensayo, se obtuvieron distintos esfuerzos en función de la deformación para cada tamaño de grano, frecuencia de carga-descarga, temperatura y amplitud de la deformación. Para esto, los ensayos de Tracción se realizaron en el Laboratorio de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas (MOP).

3.2.6.- Estudio de Resultados:

Con los distintos datos según la combinación de parámetros en estudio, se construyeron los diagramas de esfuerzo v/s deformación para distintos ensayos según sea el parámetro a analizar. Además, se estudió la dependencia entre parámetros. Con esto se determinó la Amplitud máxima de deformación en comportamiento superelástico, ESEM, la capacidad de amortiguamiento y la energía disipada.

3.3.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.3.1.- Introducción

El trabajo experimental se realizó sobre la aleación Cu-Al-Be, cuya composición es Cu 87,7 %p, Al 11,8 %p, Be 0,5 %p. Esta aleación fue fabricada por Tréfimetaux en forma de barras de 3 [mm] de diámetro.

Para el estudio del comportamiento superelástico de la aleación se realizaron ensayos Monotónicos y Cíclicos. Ambos trabajos experimentales se desarrollaron en el Laboratorio de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas (MOP), a cargo del Ingeniero Sr. Gabriel Palma.

Para el estudio, el trabajo se separó en 3 etapas:

3.3.1.1.- 1^{era} Etapa:

Como se mencionó anteriormente, existen varios parámetros que influyen sobre el comportamiento mecánico de la aleación (simulando condiciones sísmicas), dentro de los cuales se encuentra el ***Tamaño de Grano***. La primera parte experimental consistió en realizar un Tratamiento Térmico de Recocido, para generar probetas con tres Tamaños de Grano distintos.

Un primer Tamaño de Grano, inicial, era el original de la barra, que venía con una estructura recristalizada.

Así, en esta primera etapa se determinó la Temperatura y el Tiempo de Recocido necesario para obtener los 2 nuevos tamaños de grano.

Las muestras de prueba se prepararon con trozos de alambre de la aleación en estudio de 10 [mm] de largo en bakelita cocida. Con los resultados (tiempo y temperatura), se repitió el Tratamiento Térmico sobre las Probetas a ensayar mecánicamente más tarde, cuyas dimensiones eran de 70 [mm] de largo y 3 [mm] de diámetro.

3.3.1.2.- 2da Etapa:

En esta etapa se realizaron los ensayos de Tracción Monotónicos. El objetivo de esta etapa era estudiar la influencia del Tamaño de Grano (determinado en la 1^{era} etapa) y la Temperatura del ensayo sobre algunas propiedades mecánicas básicas obtenidas en los ensayos de tracción hasta la rotura. Estas propiedades son: Límite elástico, Esfuerzo Máximo, Esfuerzo de Rotura, Tenacidad, Deformación Máxima y Módulo de Young.

3.3.1.3.- 3^{era} Etapa:

En esta etapa se realizaron ensayos de Tracción Cíclicos. Con este tipo de ensayo, se obtuvo distintas curvas esfuerzo-deformación para cada tamaño de grano, frecuencia de carga-descarga, temperatura y amplitud de la deformación.

Esta etapa tuvo por objetivo determinar la Amplitud Máxima de Deformación en comportamiento superelástico, Esfuerzo Máximo Superelástico (ESEM), Capacidad de Amortiguamiento y Energía Disipada por ciclo.

3.3.2.- Variación del Tamaño de Grano:

3.3.2.1.- Introducción

Como primer paso, se registró el comportamiento de la temperatura dentro del horno. Para esto, se introdujo una termocupla adicional y se coMParó con la temperatura registrada por la termocupla propia del horno. La temperatura de esa termocupla adicional era propiamente a la que iba a estar la probeta. Se estableció que las dos temperaturas midieron valores muy similares, ver Figura Nº27, la que corresponde a una Tempertaura del horno fijada en 750 [ºC]

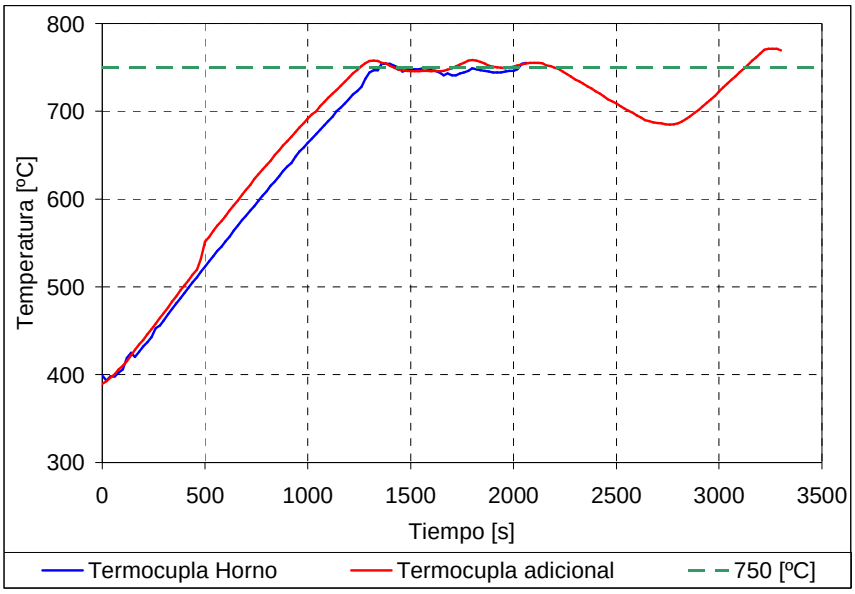


Figura Nº27

"Comportamiento de la Temperatura en el Interior del Horno para una Temperatura Nominal de 750 [ºC]"

Para lograr los distintos tamaños de grano, se procedió de la siguiente forma:

a.- Tratamiento Térmico (Recocido) de la aleación.

b.- Fabricación de la muestra en Bakelita.

c.- Proceso de pulido.

d.- Ataque químico sobre la superficie pulida.

e.- Fotografías de los granos.

f.- Cálculo del Tamaño de Grano.

3.3.2.2.- Tratamiento Térmico

Se cortaron trozos de alambres de la aleación en estudio de 10 [mm] de largo y 3 [mm] de diámetro. Las Temperaturas en estudio fueron de 700 [ºC] y 750 [ºC], y el rango de tiempos fueron de 25 a 65 [s].

A continuación, muestra una Tabla resumen con las temperaturas y tiempos respectivos en estudio:

Tabla Nº1

"Temperaturas y Tiempos para Recocido"

Temperatura [ºC]	700	750	750	750	750	750
Tiempo [s]	40	25	35	40	45	65

3.3.2.3.- Fabricación de Muestras en Bakelita:

Para medir el tamaño de grano obtenido del Tratamiento Térmico, se fabricaron muestras de la aleación en bakelita para ser observadas en un microscopio electrónico. Esta solución debe ser sometida a Presión y Tiempo determinado.

Los pasos para la fabricación fueron los siguientes:

- Un trozo de la aleación (con el TT o STT) de 10 [mm] de largo y 3 [mm] de diámetro.
- Se dispone en un cilindro de metal en la máquina "Embutidora".
- Se llena el cilindro con Bakelita
- Se somete la Bakelita a 2000 [psi] de presión, durante 30 minutos a una temperatura de 100 [ºC] aproximadamente, ver figura Nº28.

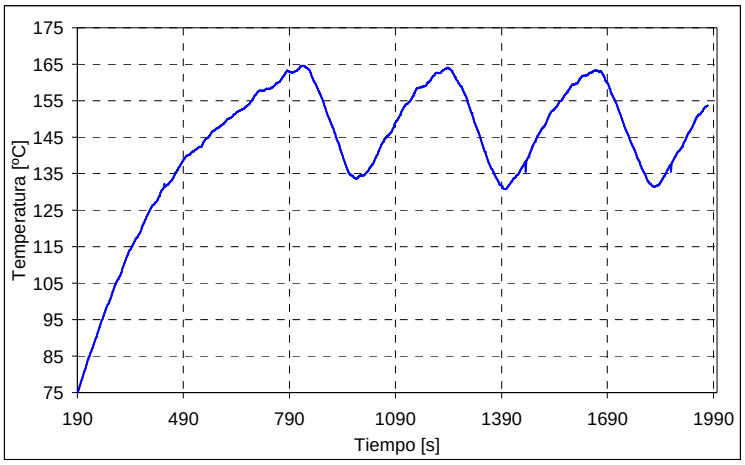


Figura Nº28

"Comportamiento de la Temperatura de cocido de la Bakelita"

Se observa en la Figura Nº28 que la temperatura varía de forma sinusoidal. Esto se debe al regulador incorporado. La temperatura va de 130 [ºC] varía de forma sinusoidal a 165 [ºC].

El resultado del proceso anterior es un cilindro de bakelita solidificado en cuyo interior se encuentra el trozo de la aleación a estudiar.

3.3.2.4.- Proceso de Pulido:

Una vez fabricadas las muestras en Bakelita, se procede a pulir las muestras para el estudio de la microestructura. Para este proceso se utilizan distintos tipos de lija: 180 (más gruesa), 400, 600 y un paño.

Lo ideal es pulir la superficie hasta llegar al diámetro del alambre (3 [mm]) como muestra la Figura Nº29.

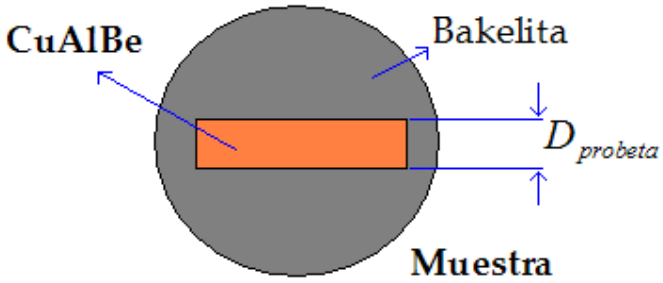


Figura Nº29
"Muestra de CuAlBe"

3.3.2.5.- Ataque químico:

Una vez pulida y limpia la superficie, ésta se ataca con una solución química compuesta de:

- Alcohol (96 [cc])
- Ácido Clorhídrico (2 [cc])
- Cloruro Férrico (1 [gr])

3.3.2.6.- Fotografías de las Microestructuras

Las fotografías de la microestructura se tomaron en el Laboratorio Docente del IDIEM con un microscopio óptico. Las fotografías que se tomaron fueron las siguientes:

Tabla Nº2

"Cuadro resumen de los tratamientos realizados a la aleación"

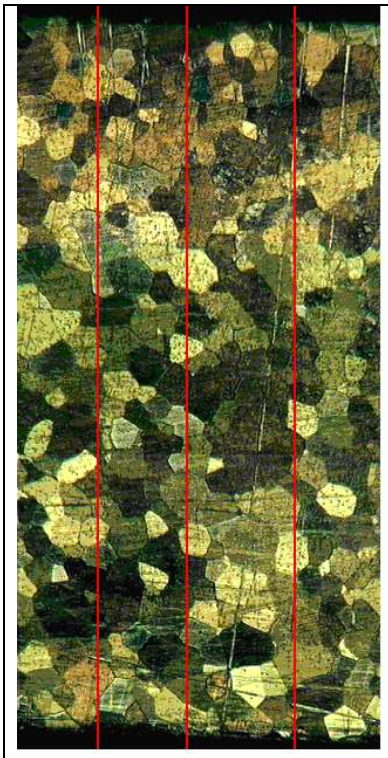
Item	Temperatura de Recocido de la Muestra	Tiempo de Recocido de la Muestra
1	700	40
2	700	45
3	700	50
4	750	25
5	750	35
6	750	40
7	750	45
8	750	65

3.3.2.7.- Cálculo del Tamaño de Grano:

Para calcular el tamaño de grano promedio se usó el método de la "Línea Interceptada". Para esto se trazan 3 líneas sobre la fotografía y se cuenta el número de granos que intercepta cada línea, luego se calcula el promedio de estos considerando el ancho real de la probeta descubierta en la bakelita[3]. Con el número promedio de granos y considerando el ancho real de la muestra se obtiene el tamaño promedio de grano.

A modo de ejemplo, se presenta la siguiente Figura:

[3] Generalmente el ancho de la probeta descubierta en la muestra en bakelita no corresponde al ancho real del alambre (3 [mm]), por lo que para obtener el tamaño de grano promedio se consideró el ancho descubierto en la muestra.



Aleación	: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tratamiento Térmico	: No
Temperatura	: No
Tiempo	: No
Número de Granos por línea	: 30 / 30 / 33
Número de Granos Promedio	: 31
Ancho de la Muestra [mm]	: 2
Ancho de la Muestra [micrón]	: 2000
Tamaño de Grano Promedio [micrón]	: 64,5

Figura 30
"Ejemplo del Método de la Línea Interceptada"

Por lo tanto, el Tamaño de Grano promedio para la probeta sin Tratamiento Térmico es de 64,5 $[\mu m]$

Para controlar el proceso del Tratamiento Térmico para generar distintos Tamaños de Grano, se registró la temperatura dentro del horno. En el siguiente gráfico se puede observar los resultados obtenidos.

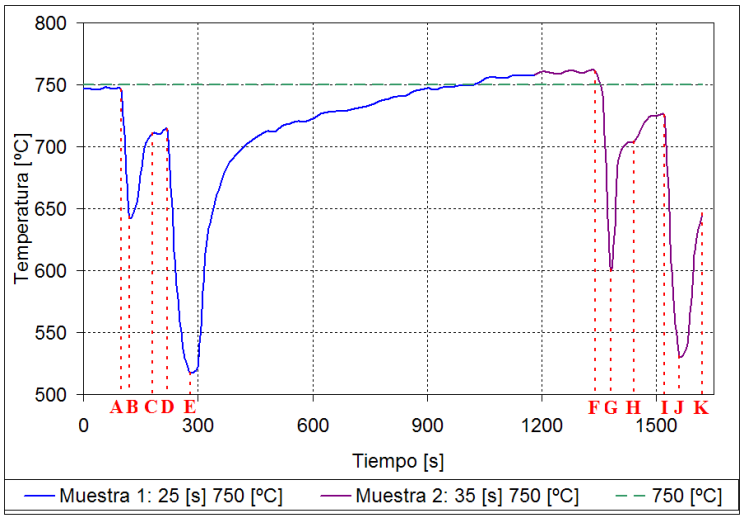


Figura 31
"Comportamiento de la temperatura ambiente dentro del Horno para 2 recocidos de muestras"

Después de programar el horno a 750 [ºC], éste se mantuvo durante 1 [h] para lograr un régimen permanente. En la Figura Nº31 se pueden distinguir varios puntos:

-A : Régimen permanente a 750 [ºC].
A : Apertura de la compuerta del Horno para introducir la muestra.
B : Cierre de la compuerta del Horno.
B-C : Tiempo de Recocido.
C,D : Apertura de la compuerta del Horno para sustraer la muestra.
E : Cierre de la puerta del Horno.
E-F : Tiempo necesario para regresar al régimen permanente (750 [ºC]).
F : Apertura de la compuerta del Horno para introducir la 2da muestra.
G : Cierre de la puerta del Horno.
G-H : Tiempo de Recocido.
H,I : Apertura de la compuerta del Horno para sustraer la muestra.
J : Cierre de la compuerta del Horno.
J-K : Tiempo necesario para regresar al régimen permanente (750 [ºC]).

Como se observa, el tiempo necesario para repetir los ensayos es a lo menos 20 [min], de otra manera, la temperatura inicial es distinta a 750 [ºC].

En el momento de cerrar la compuerta del horno con la muestra en el interior, la temperatura ambiente del horno baja un poco más de 100 [ºC], vale decir, a 640 [ºC] y

sube hasta llegar a 710 [ºC] cuando la compuerta se abre para retirar la aleación. Por este motivo, la temperatura real de la probeta en el interior no es 750 [ºC], sino inferior, y depende del tiempo que la compuerta se mantenga abierta perdiendo calor.

A pesar de esta observación, las experiencias se repitieron estandarizando los tiempos de apertura de la compuerta. Cabe señalar que el objetivo de la memoria no es el estudio del comportamiento del tamaño de grano con respecto al tiempo y temperatura de recocido, sino que obtener 3 tamaños de granos claramente diferenciables entre ellos.

Para evitar este tipo de inconvenientes, en las probetas definitivas a ensayar se les practicó el Tratamiento Térmico al mismo tiempo construyendo un canastillo de cobre, como muestra la Figura Nº32:

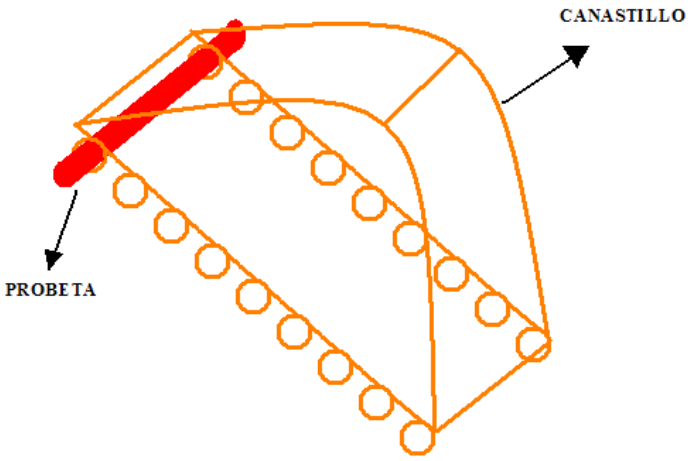


Figura 32
"Canastillo porta probetas para Tratamiento Térmico definitivo a probetas"

Así, las 9 probetas experimentaron el mismo tratamiento térmico y, por lo tanto, se generaron, básicamente, los mismos tamaños de grano. Este proceso se repitió 2 veces debido a que en total se necesitan 9 probetas con d_2 y 9 probetas con d_3. Para las otras 9 probetas con tamaño de grano d_1 (grano fino) no se les aplicó el tratamiento térmico.

Se desarrollaron tres Tamaños de Grano recristalizados. El primero corresponde al tamaño inicial de los granos (fino), 64,5 $[\mu m]$. Los otros dos fueron de 95,2 $[\mu m]$ (Medio) y 250 $[\mu m]$ (Grueso); éstos últimos se obtuvieron por recocido a 750 [ºC] durante 35 [s] y 45 [s]

respectivamente.Obviamente las condiciones de recocido dependen del tamaño de la muestra y del horno empleado.

3.3.3.- Ensayos de Tracción Monotónica:

3.3.3.1.- Procedimiento para el montaje:

Los ensayos monotónicos consisten en ensayos de tracción simple hasta la rotura, cuya carga aplicada a una velocidad constante en dirección axial con respecto a la probeta en estudio. Para estos ensayos se empleó una velocidad constante de tracción del cabezal de 0,1 [mm/s].

Las probetas fueron usadas directamente, 3 [mm] de diámetro sin mecanizarlas. El largo total fue de 70 [mm] y la distancia libre entre mordazas fue de 30 [mm] aproximadamente. El extensómetro usado fue de 25,4 [mm]

Los ensayos de Tracción se realizaron bajo dos parámetros de estudio: Tamaño de Grano y Temperatura. Las combinaciones se muestran en la siguiente tabla:

Tabla Nº3
"Ensayos de Tracción Monotónicos"

Número de Ensayo	Tamaño de Grano	Temperatura de Ensayo
1	d_1	T_2
2		T_3
3	d_2	T_2
4		T_3
5	d_3	T_2
6		T_3

Donde:

d_1 : Tamaño de Grano Fino.

d_2 : Tamaño de Grano Medio.

d_3 : Tamaño de Grano Grueso.

T_i : Temperatura de Ensayo.

Con $T_2 < T_3$.

3.3.3.2.- Obtención de Resultados:

Sea la siguiente curva representativa de Esfuerzo v/s Deformación para un ensayo de tracción simple o monotónico:

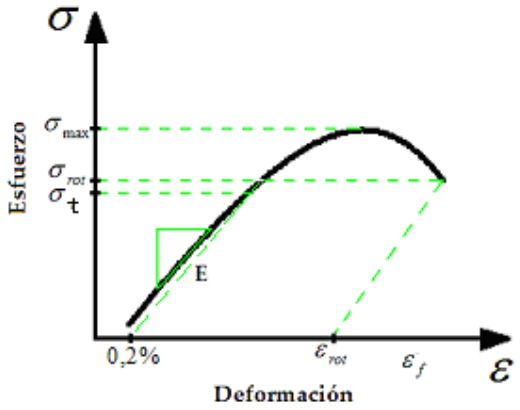


Figura Nº31
"Curva representativa para ensayo Monotónico"

Los resultados a obtener son:

σ_{max} : Esfuerzo Máximo

σ_{rot} : Esfuerzo de Rotura

σ_t : Esfuerzo de transformación de Austenita a Martencita

E : Módulo de Elasticidad o Young

ε_f : Deformación del límite elástico

ε_{rot} : Deformación Máxima

3.3.4.- Ensayos Cíclicos:

3.3.4.1.- Procedimiento para el montaje:

El ensayo cíclico consiste en la aplicación de carga-descarga axial sobre la probeta a una frecuencia y amplitud determinada.

Se consideraron dos probetas para cada par de Temperatura-Tamaño de Grano
Estos ensayos se realizaron en el Laboratorio de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas (MOP).

Para cada par (d_i, T_i) se utilizaron 2 probetas, realizando el ciclo de carga y descarga con amplitudes de deformación A_i, y una frecuencia ν_i.

Los pasos son:

- Paso 1: Ajustar la Temperatura ambiente del ensayo, T_1.
- Paso 2: Ajustar la probeta de tamaño de grano d_1 a la máquina de ensayo
- Paso 3: Programar los ciclos de carga-descarga a una frecuencia ν_1 y una Amplitud A_2 ($A_1 < A_2$).
- Paso 4: Reprogramar los ciclos de carga-descarga a una frecuencia ν_1 y una Amplitud A_1.
- Paso 5: Reprogramar los ciclos de carga-descarga a una frecuencia ν_1 y volver a la amplitud anterior A_2.
- Paso 6: Luego el ciclo se repite (volver al paso 3) pero con una frecuencia distinta ν_2 y se repiten los pasos 4, 5 y 6.
- Paso 7: Cambiar la probeta, ahora con un tamaño de grano d_2 y repetir los pasos 2, 3, 4, 5, 6 y 7, para los 3 tamaños de grano d_1, d_2 y d_3.
- Paso 8: Reajustar la Temperatura ambiente a T_2 y repetir el ciclo completo (paso 2, 3, 4, 5, 6, 7).

3.3.4.2.- Regulación Temperatura de Ensayo

Para regular la Temperatura de Ensayo a 50 [ºC] (Temperatura Alta) se fabricó una Cámara Térmica. Esta consistió en una caja de plumavit recubierta en su interior por papel de aluminio. La fuente calórica fue generada por dos ampolletas infrarojas de 250 [Watt] de potencia. El principio de la generación calórica fue por Radiación de las fuentes de calor y Reflexión en el papel de aluminio dentro de la caja. La forma de regulación de las fuentes de enería fue por medio de un Damper.

La siguiente figura muestra la Caja Térmica usada en las experiencias a Temperaturas de Ensayo Alta[4]:

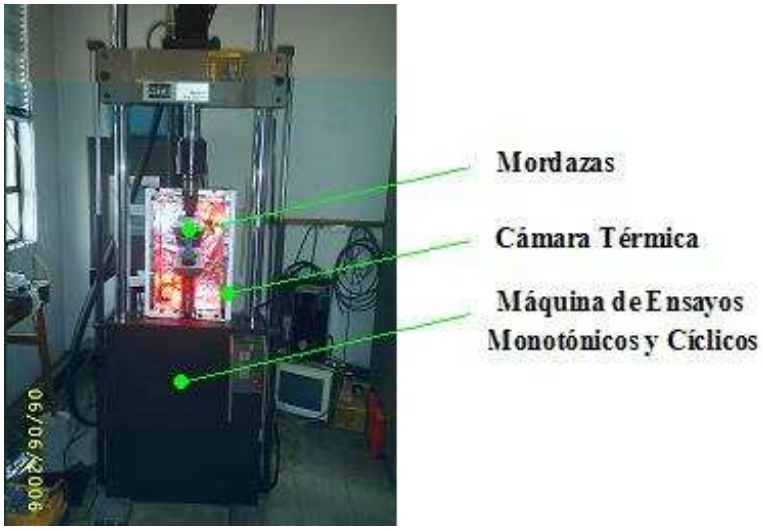


Figura Nº32
Máquina de ensayos monotónicos y cíclicos. En ella se observa la incorporación de la Cámara Térmica incorporada para elevar la temperatura de ensayo.

En la siguiente figura se muestra una fotografía de la instalación eléctrica dentro de la Cámara térmica:

[4] Las figuras muestran fotografías de la Cámara Térmica abierta para mostrar disposición de los elementos en su interior. Esta se cierra en operación.

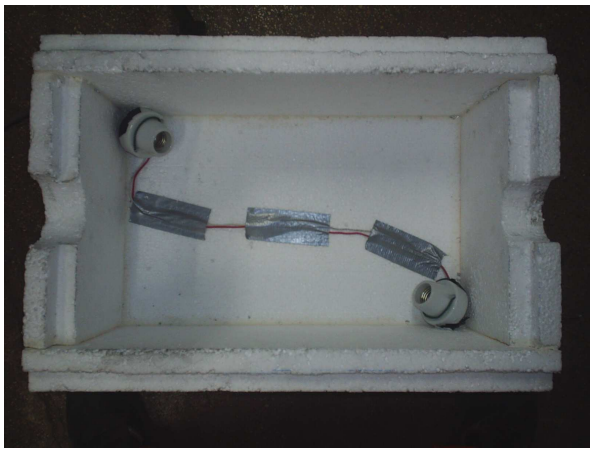


Figura Nº332
Instalación eléctrica en Cámara Térmica

En la siguiente figura se muestra el montaje de la Cámara Térmica en la Máquina de ensayos monotónicos y cíclicos:

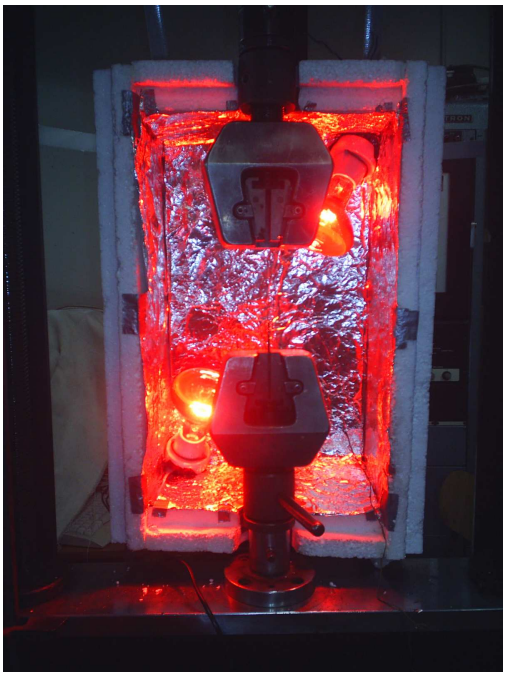


Figura Nº33
Disposición general de Fuentes de energía calórica en Cámara Térmica en Máquina de Ensayos

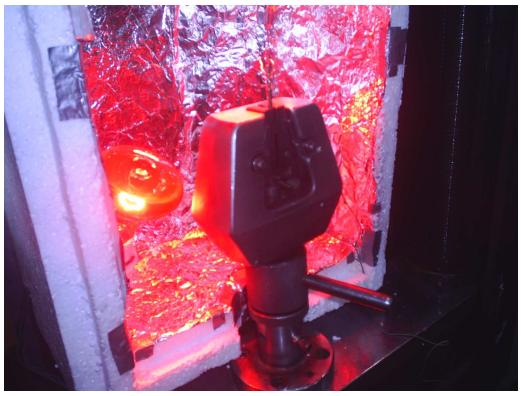


Figura Nº34
Disposición general de Cámara Térmica en Máquina de Ensayos

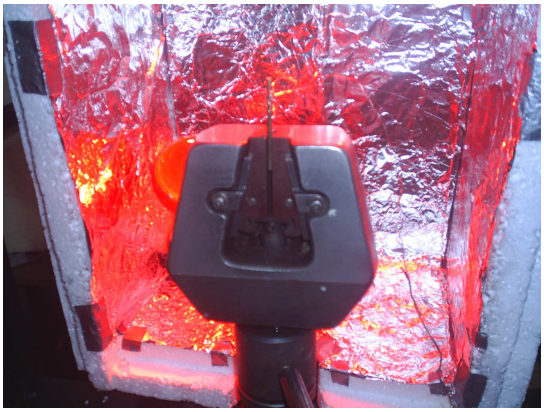


Figura Nº35
Disposición de probeta a ensayar de la aleación en estudio (Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be) en mordaza.

3.3.4.3.- Obtención de resultados:

Sea la siguiente curva representativa de Esfuerzo v/s Deformación para un ensayo cíclico de una aleación superelástica:

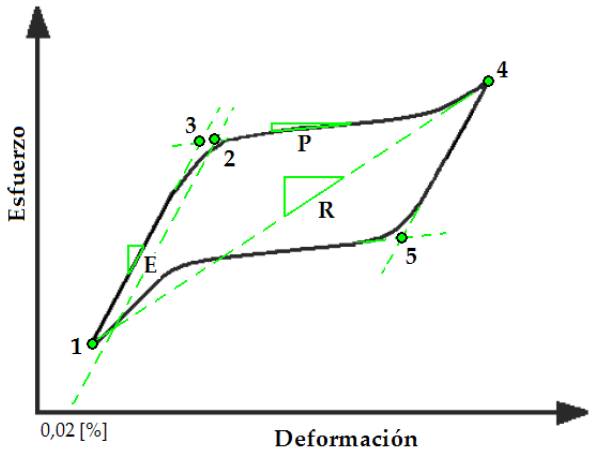


Figura Nº36
"Muestra de CuAlBe"

En la Figura anterior se señalan pendientes e intersecciones que a continuación se definen:

E : Módulo de Elasticidad Austenítica. Corresponde a la pendiente del primer comportamiento lineal de la curva en tracción común en los materiales (100 [%] Austenita)

P : Pendiente Plateau. Corresponde al segundo comportamiento lineal de la curva en el ciclo de tracción, En este tramo, el material se encuentra formada por una estructura bifásica (*Austenita* $\rightarrow$ *Martensita*) inducida por deformación plástica.

R : Rigidez Secante del Ciclo. Corresponde a la pendiente de la línea trazada que une el valor del esfuerzo mínimo (punto 1) con el valor de esfuerzo máximo.

1 : Punto de Inicio del Ensayo. En este punto los valores de esfuerzo y deformación son mínimos.

2 : Límite de Fluencia. Este valor se determina por la intersección de la curva de tracción y una línea auxiliar de pendiente igual al módulo de Young e interceptando al eje de las deformaciones en el valor $\varepsilon = 0{,}02[\%]$.

3 : Inicio de Transformación Martensítica (TM). El valor corresponde a la intersección de dos líneas auxiliares, cuyas pendientes son E y P (Módulo de Young y Plateau).

4 : En este punto los valores de esfuerzo y deformación son máximos.

5 : Inicio de Transformación Inversa, *Martensita* $\rightarrow$ *Austenita* . Este valor se determina mediante la intersección de dos líneas auxiliares, la primera corresponde a una prolongación del tramo de deformación elástica de la martensita en la curva de relajación y la segunda línea corresponde a una prolongación del tramo de Transformación Inversa.

Una vez determinados los valores del ciclo, se determinararon los coeficientes de Amortiguamiento según Liw y Van Humbeck [11] y Chopra [12], cuyas ecuaciones son:

$$\xi_1 = \frac{2 * Área_Ciclo}{\pi * (\sigma_{max} - \sigma_{min}) * (\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min})} = \frac{E_d}{\pi * E_s} \quad (5)$$

$$\xi_2 = \xi_{Liw} = \frac{Área_Ciclo}{2 * \pi * Área_Envolvente} = \frac{E_d}{2 * \pi * E_t} \quad (6)$$

$$\xi_3 = \xi_{Chopra} = \frac{Área_Ciclo}{4 * \pi * Área_Triángulo} = \frac{E_d}{4 * \pi * E_s} \quad (7)$$

$$K_c = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_{max}} \quad (8)$$

$$K_s = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min})} \quad (9)$$

Donde Ed, Et, Es, Kc y Ks se definen como se muestra a continuación:

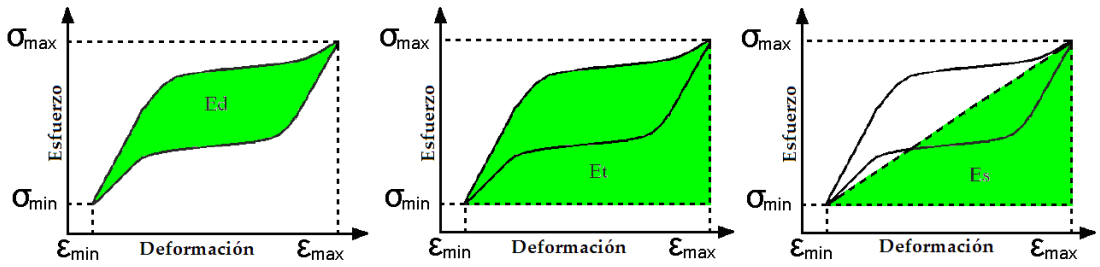


Figura Nº37a

"Parámetros Ed, Et y Es (Áreas del ciclo de Histéresis) para el cálculo de los Factores de Amortiguamiento (ξ_1, ξ_2, ξ_3) *de la aleación"*

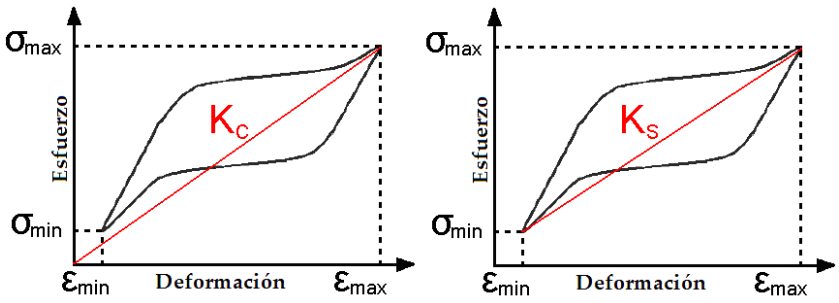


Figura N°37b
"Rigidez del Ciclo (Kc) y Rigidez Secante (Ks)"

3.3.4.4.- Gráfico de resultados:

Para graficar los resultados de los ensayos cíclicos se seguirán el siguiete procedimiento:

- En una primera figura se graficarán 2 ciclos de los 10 ciclos totales por serie de datos, vale decir, por cada amplitud de deformación con los valores originales. Según lo observado en las curvas experimentales, el primer ciclo es distinto a los demás, mientras que el segundo ciclo es representativo de losdemás 8. es por esta razón que se graficacron solo los dos primeros ciclos. Sin embargo, los ciclos tetales se encuentran disponibles en anexo A.

- En una segunda figura se graficará lo mismo que en el punto anterior pero elprimer punt de la primera serie se llevará al origen. Luego, el primer punto la segunda serie se hará coincidr con el último punto de la serie anterior. Así se busca continuidad en la curva y una mayor representatividad de lo experimentado. Además, esta es una forma de detectar deformación remanente, por lo que la pobeta estaría fura del rango superelástico.

- En una tercera figura, se graficarán las series de ciclos desfasados para mostrar el comportamiento superelástico de cada serie con los datos originales.

- En una cuarta figura, se graficarán las series de ciclos desfasados para mostrar el comportamiento superelástico de cada serie con los datos orregidos.

4.- RESULTADOS

4.1.- VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO

4.1.1.- Resultado

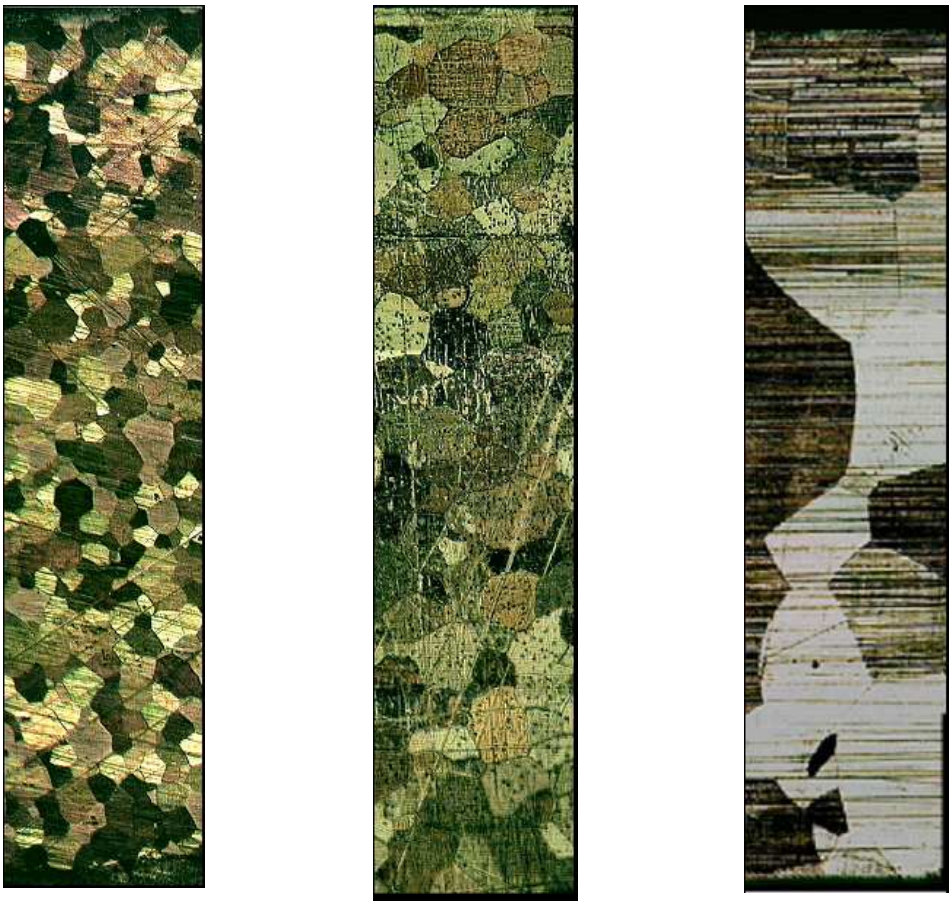
Según Método de la Línea Interceptada, el Tamaño de Grano promedio obtenidos se resumen en la Tabla Nº4:

Tabla Nº4
"Resumen de datos para los distintos Tamaños de Granos"

Temperatura de Recocido [ºC]			750	750	750	700	750	750	750	750
Tiempo de Recocido [s]		0	25	25	35	40	35	40	45	65
# de Granos	1era línea	30	27	22	22	24	18	17	8	5
	2da línea	30	26	26	25	22	21	16	7	5
	3era línea	33	26	24	23	21	24	18	8	6
# Promedio de Granos		31	26	24	23	22	21	17	8	5
Longitud por Línea [mm]		2	2	2	2	2	2	2	2	2
Tamaño de Grano Promedio [µm]		**64,5**	76,9	83,3	87,0	90,9	**95,2**	117,6	**250**	400,0

Así, se llamará Tamaño de Grano Fino d1 = 64,5 [µm], Tamaño de Grano Medio a d2 = 95,2 [µm] y Tamaño de Grano Grueso d3 = 250 [µm].

Las Metalografía de los Tamaños de Granos seleccionados, con color rojo, se muestan en la Figura Nº38



Sin TT	*T = 750 [ºC]*	*T = 750 [ºC]*
d1 = 64,5 [μm]	*t = 35 [s]*	*t = 45 [s]*
	d2 = 95,2 [μm]	*d3 = 250 [μm].*

Figura 38

"Metalografías de los tres Tamaños de Grano considerados para los ensayos mecánicos"

En la Figura Nº38 se puede observar como el Tamaño de Grano aumenta con el aumento del tiempo de Recocido. Este comportamiento responde a lo visto en el estudio de antecedentes.

4.2.- ENSAYOS DE TRACCIÓN MONOTÓNICA

4.2.1.- Resultados

En la Figura 39a y 39b se pesentan las curvas de tracción obtenidas a: a) 20ºC y b)50ºC, para los tres tamaños de grano de interés. Después, en la Figura 40a y 40b, se presenta la misma información gráfica, en función del parámetro Tamaño de Grano, a) d1, b) d2 y c) d3, para las dos temperaturas de interés.

Para estos ensayos se empleó una velocidad constante de desplazamiento del cabezal de 0,1 [mm/s]

4.2.1.1.- Gráficos Ensayos de Tracción Monotónicos a Temperatura Ambiente (T=T1=20 [ºC] aprox.) y Temperatura Alta (T=T2=50 [ºC] aprox.)

Las figuras 39a y 39b muestran las curvas de tracción obtenidas para los tres Tamaños de Grano: d1 (Fino 64,5 [μm]), d2 (Medio 95,2 [μm]) y d3 (Grueso 250 [μm]) a 20 [ºC] y 50 [ºC] respectivamente.

4.2.1.2.- Gráficos Ensayos de Tracción Monotónicos para los tres Tamaños de Grano (d1 = 64,5 [μm], d2 = 95,2 [μm] y d3 = 250 [μm])

Las figuras 40a, 40b y 40c muestran las curvas de tracción obtenidas a 20 [ºC] y 50 [ºC] para los tres Tamaños de Grano: d1 (Fino 64,5 [μm]), d2 (Medio 95,2 [μm]) y d3 (Grueso 250 [μm]) a 20 [ºC] y 50 [ºC] respectivamente.

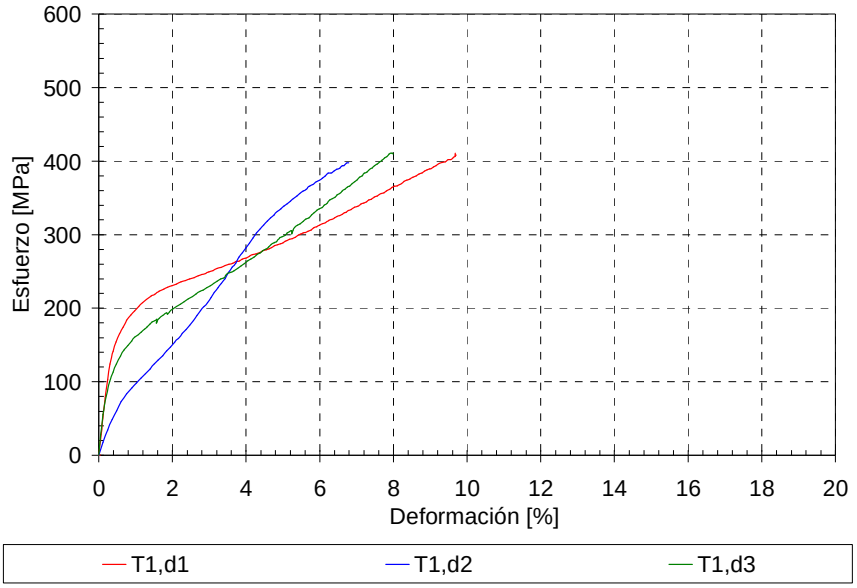


Figura Nº39a

"Curvas de Tracción para los tres Tamaños de Grano y Temperatura de Ensayo Ambiente, 20 [ºC] aproximadamente"

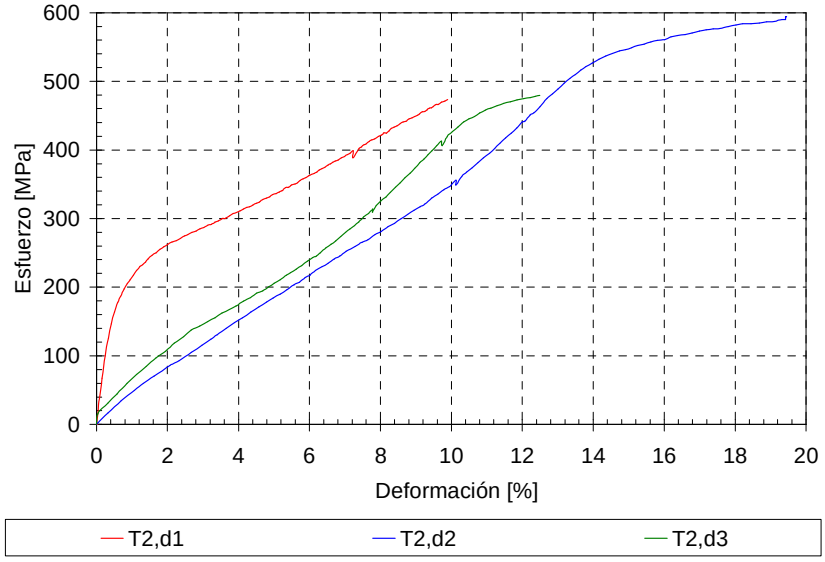


Figura Nº39b

"Curvas de Tracción para los tres Tamaños de Grano y Temperatura de Ensayo Alta, 50 [ºC] aproximadamente"

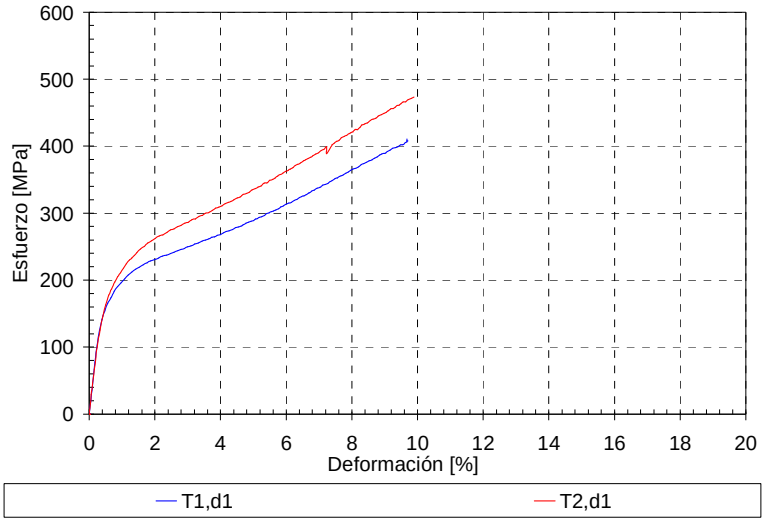


Figura Nº40a
"Curvas de Tracción Monotónica para las dos Temperaturas de Ensayo: T1 Ambiente (20 [ºC] aprox) y Alta (50 [ºC] aprox.); y Tamaño de Grano Fino d1 = 64,5 [μm]"

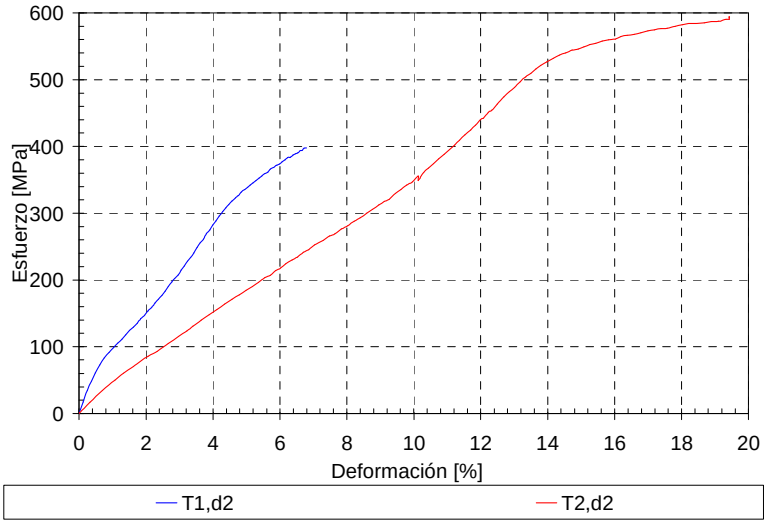


Figura Nº40b
"Curvas de Tracción Monotónica para las dos Temperaturas de Ensayo: T1 Ambiente (20 [ºC] aprox) y Alta (50 [ºC] aprox.); y Tamaño de Grano Medio d2 = 95,2 [μm]"

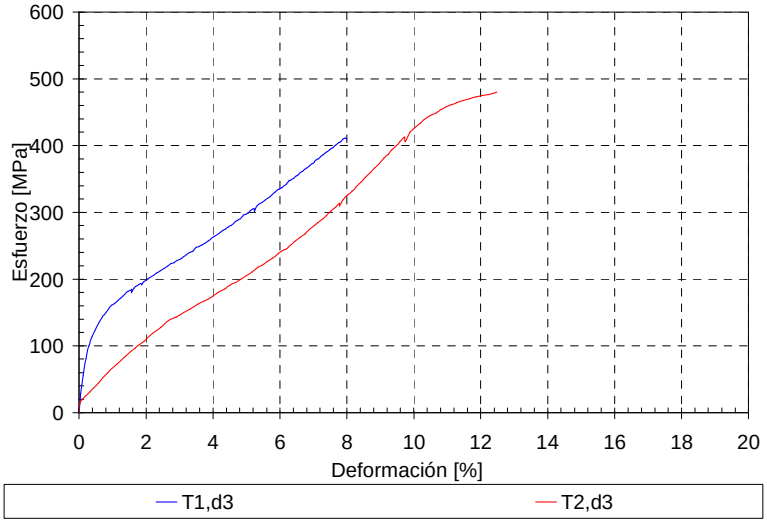


Figura Nº40c
"Curvas de Tracción Monotónica para las dos Temperaturas de Ensayo: T1 Ambiente (20 [ºC] aprox) y Alta (50 [ºC] aprox.); y Tamaño de Grano Grueso d3 = 250 [μm]"

4.2.1.3.- Propiedades Mecánicas

En la Tabla Nº5 se resumen algunas cifrasmecánicas obtenidas de las curvas de las Figuras 39 y 40:

Tabla Nº5
"Resultados Ensayo Monotónicos"

	Tamaño Grano		Temp. Ensayo		Módulo Young	Esf. de Transf. Aust-Mart.	Esf. Máximo	Esf. Rotura	Def. Máx con carga
			[ºC]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
1	d1	64.5	T1	20	229,25	183,4	410,9	410,9	9,67
2	d1	64.5	T2	50	120,7	205,2	473,4	473,4	19,78
3	d2	95,2	T1	20	-	-	397,4	397,4	6,78
4	d2	95,2	T2	50	-	-	590	590	19,43
5	d3	250	T1	20	207,83	149	409,5	409,5	7,99
6	d3	250	T2	50	-	-	479,9	479,9	12,49

De las Figuras 40a, 40b y 40c se observa que el material alcanza mayores deformaciones a mayores temperaturas de ensayo. Esto se debe a que el Esfuerzo de Transformación depende directamente de la temperatura: $\uparrow T \Rightarrow \uparrow \sigma_f$.

Las figuras 39a, 39b y 39c muestran que el Tamaño de Grano influye en el comportamiento mecánico del material. Esto se debe a que a menor Tamaño de Grano, más homogénea es la estructura interna de la aleación, por lo que en los gráficos se distingue el rango elástico y plástico, junto con los esfuerzos de rotura y deformaciones máximas.

Cabe señalar que al aumentar el tiempo de recristalización, el tamaño de Grano de los granos grandes (iniciales) crecen, mientras que los granos menores (iniciales) disminuyen hasta desaparecer, existiendo una mayor diferencia entre los granos mayores y los menores, por lo que las propiedades cambian por falta de homogeneidad en la estructura cristalina interna. Así, el comportamiento es más estable mientras menor sea el Tamaño de Grano, en este caso, d = d1 = 64,5 [μm] (Tamaño de Grano inicial de la aleación)

En las figuras Nº 39 y 40 no es posible determinar un límite elástico pues no se observa un cambio aparente que indique cambio en la estructura interna. Sólo es posible determinar esfuerzo máximo y la deformación asociada, que coincide con el esfuerzo de rotura y deformación máxima.

4.3.- ENSAYOS CÍCLICOS

Para los ensayos cíclicos, los parámetros en estudio son: Tamaño de Grano, Temperatura de Ensayo, Frecuencia de Oscilación y Número de Ciclos.

4.3.1.- Resultado: Variación de la Amplitud de Deformación, 10 ciclos

En este capítulo se presentan los resultados de ensayos de tracción cíclicos, para amplitudes crecientes de deformación. Esto se hizo para distintas parejas de temperatura (T1 y T2) y de tamaños de grano (d1, d2 y d3), siempre para la frecuencia de 1 Hz, con n=10 ciclos por serie.

El control de los ensayos era por control del cabezal; de modo que las deformaciones nominales corresponden al desplazamiento del cabezal dividido por la distancia entre las mordazas. Para procurar evitar el pandeo de las probetas, se imponía inicialmente una deformación nominal de 0,5%, en tracción; sobre ese valor se imponía la deformación nominal asociada a la respectiva serie de ciclos. (Hacia el final de estos ensayos, el Sr. Palma indicó que un procedimiento general consistía en imponer una deformación nominal inicial correspondiente al 10% de la amplitud de deformación a aplicar)

Para cada pareja temperatura-tiempo, se presentan cuatro gráficos esfuerzo-deformación, en la secuencia siguiente, ver Tabla Nº6:

- Series sin corrección
- Series con corrección, donde la corrección consiste en: a) el primer ciclo se hizo partir del origen del plano esfuerzo-deformación y b) cada serie siguiente partía en el último punto de la serie anterior.
- Series desplazadas entre sí y dispuestas en orden secuencial, con corrección

Cabe señalar que, en afán de claridad, en estos gráficos sólo se han representado los dos primeros ciclos de cada serie. El primer ciclo de cada serie siempre era bastante diferente del resto, y los otros ciclos eran bastante similares entre sí.

Tabla Nº6

Figuras correspondiente a cada pareja Temperatura-Tamaño de Grano de los ensayos cíclicos a diferentes amplitudes de deformación.

Temperatura	Tamaño de Grano	Nº de la Figura	Páginas		
T1	d1	41a, 41b y 41c	68	69	69
	d2	42a, 42b y 42c	70	71	71
	d3	43a, 43b y 43c	72	73	73
T2	d1	44a, 44b y 44c	75	76	76
	d2	45a, 45b y 45c	78	79	79
	d3	46a, 46b y 46c	81	82	82

4.3.1.1.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Media y Tamaño de Grano Fino

En las figuras 41a, 41b y 41c se puede observar los resultados de los ensyos cíclicos a una amplitud de Deformación creciente.

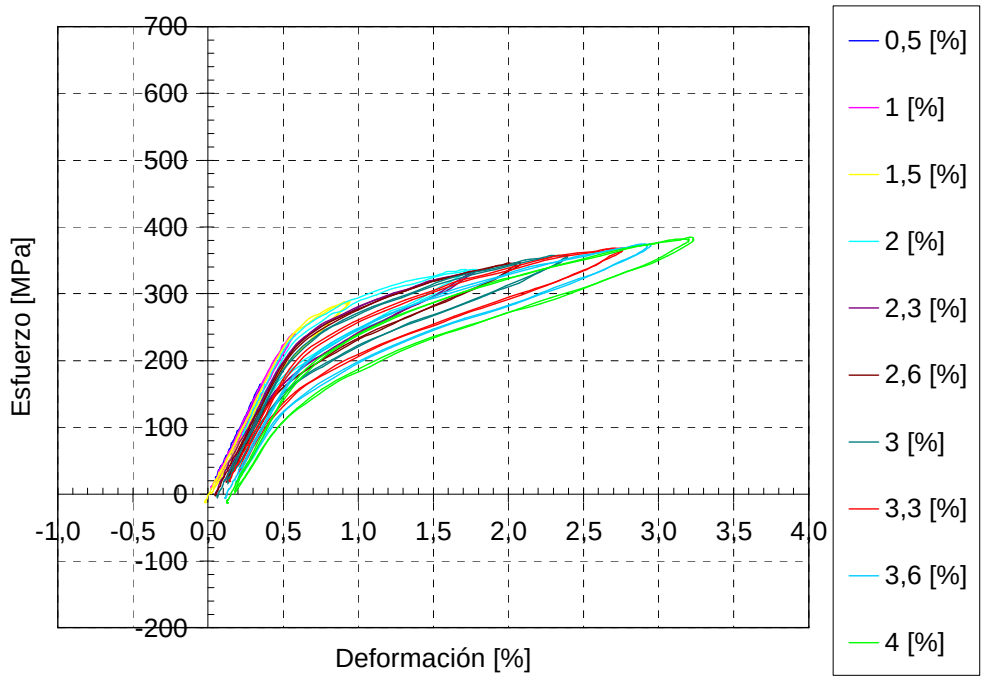


Figura Nº41a

Tipo de Ensayo: Cíclico, datos originales. Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d1, Fino. Temperatura de ensayo: T1, Media. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz], Número de Ciclos: 10

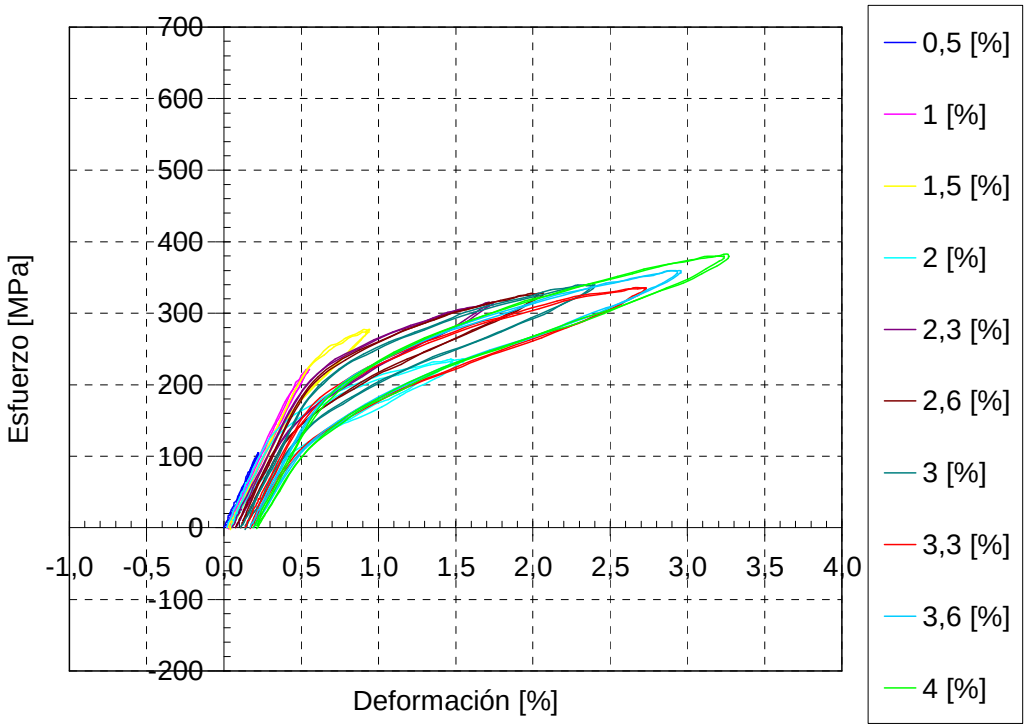


Figura Nº41b

Tipo de Ensayo: Cíclico, datos originales Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d1, Fino. Temperatura de ensayo: T1, Media. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 10

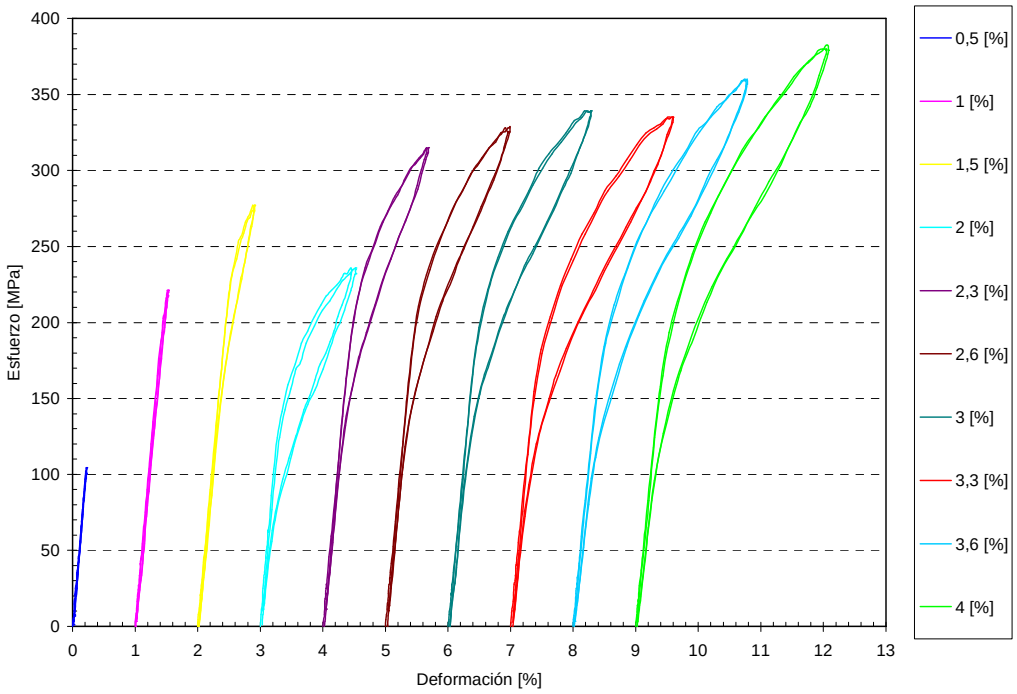


Figura Nº41c

Tipo de Ensayo: Cíclico corregido Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d1, Fino. Temperatura de ensayo: T1, Media. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 2

Como se puede ver en la figura Nº41c, el material se comporta efectivamente como una aleación superelástica para un Tamaño de Grano Fino (d = d1 = 64, 5 [μm]) y Temperatura de Ensayo Media (Temperatura Ambiente), Frecuencia de Oscilación de 1 [Hz] y 10 ciclos.

Durante las 10 Deformaciones Nominales impuestas (de 0,5 [%] a 4 [%] nominal, 0,2 [%] a 3,2 [%] real), la aleación no presentó deformación remanente considerable que indica cambio de fase a martensita retenida (ver figura Nº41b, alrededor de 0,2 [%]).

Para la cuarta serie, de Amplitud de Deformación Nominal de 2 [%] y Deformación Real de 0,92 [%] existe una anomalía en la toma de datos. Es posible que esto se asocie a una incorrecta ubicaión del cero en esfuerzo

4.3.1.2.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Media y Tamaño de Grano Medio

En las figuras 42a, 42b y 42c se puede observar los resultados de los ensyos cíclicos a una amplitud de Deformación creciente.

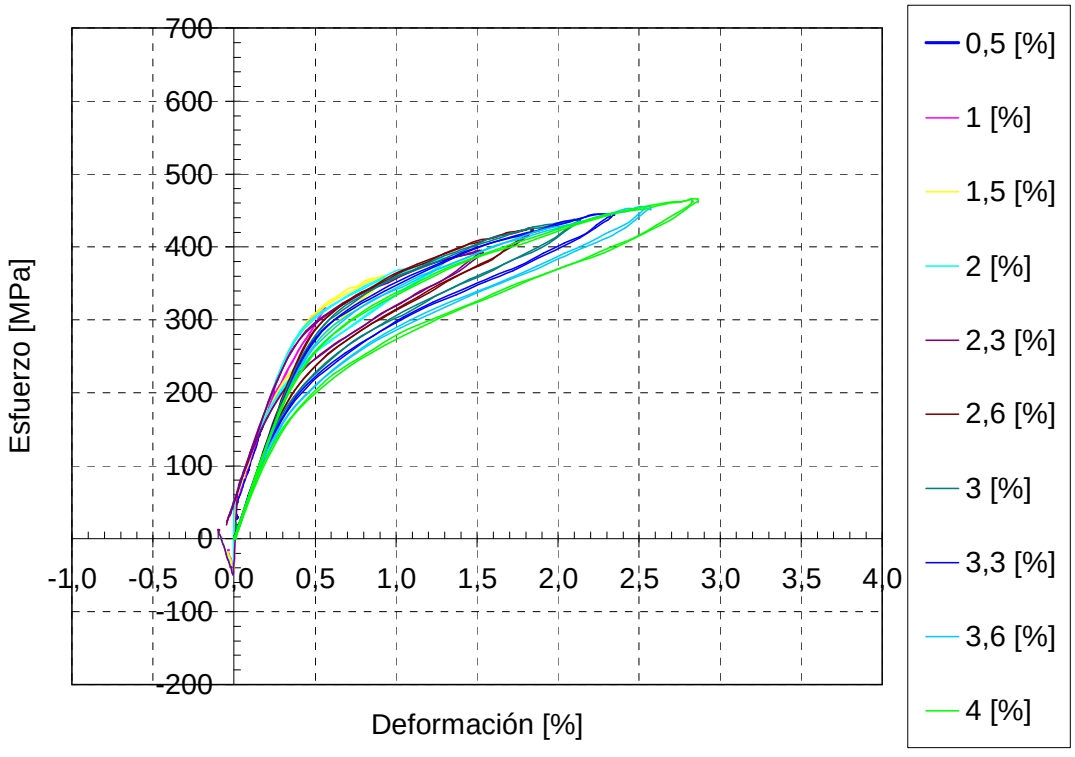


Figura Nº42a
Tipo de Ensayo: Cíclico, datos originales Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d2, Medio. Temperatura de ensayo: T1, Media. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 10

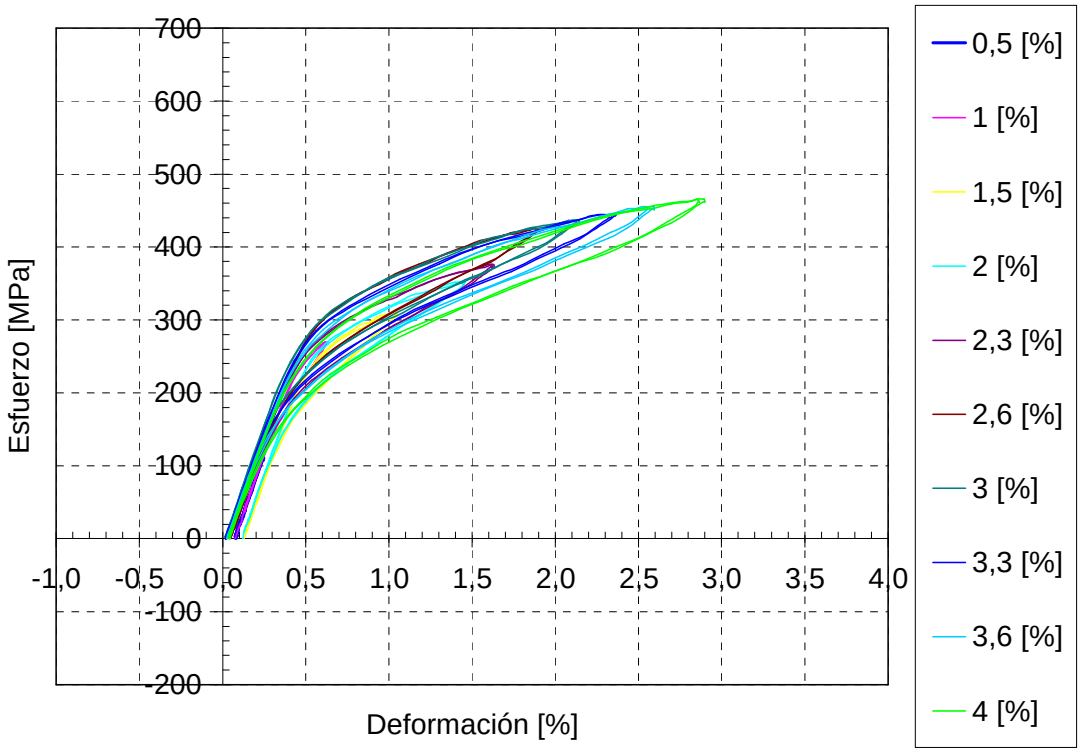


Figura Nº42b

Tipo de Ensayo: Cíclico corregido Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d2, Medio. Temperatura de ensayo: T1, Media. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 2

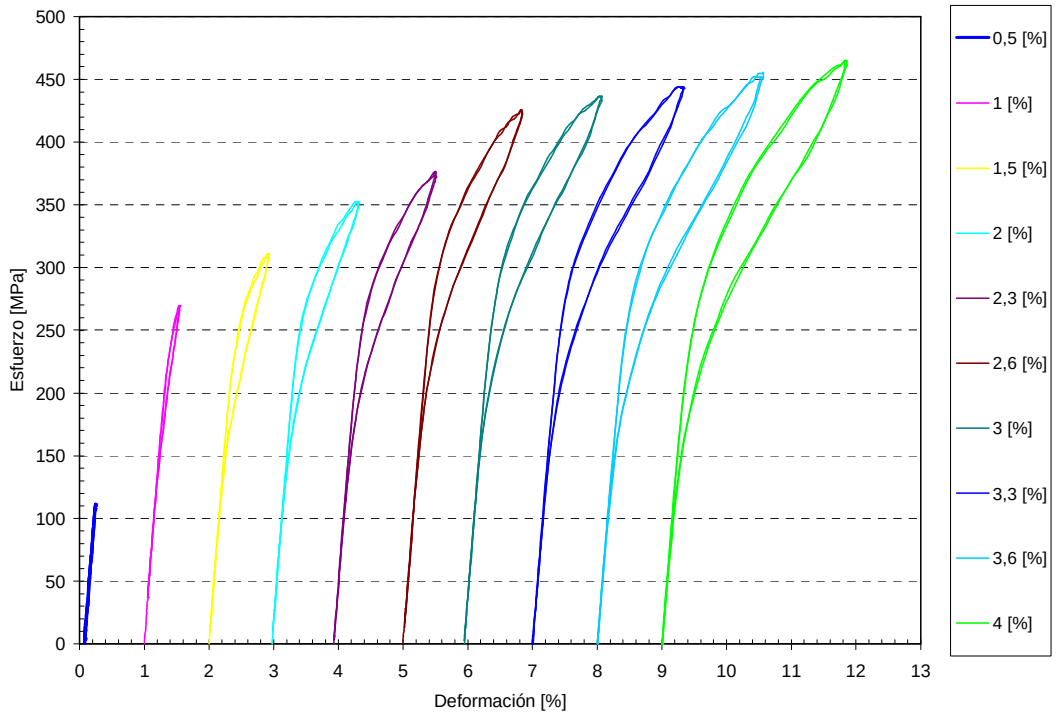


Figura Nº42c

Tipo de Ensayo: Cíclico corregido Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d2, Medio. Temperatura de ensayo: T1, Media. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 2

Como se puede ver en la figura Nº42c, el material se comporta efectivamente como una aleación superelástica para un Tamaño de Grano Medio (d = d2 = 95,2 [μm]) y Temperatura de Ensayo Media (Temperatura Ambiente), Frecuencia de Oscilación de 1 [Hz] y 10 ciclos.

Durante las 10 deformaciones nominales impuestas (de 0,5 [%] a 4 [%] nominal, 0,2 [%] a 2,8 [%] real), la aleación no presentó deformación remanente considerable que indica cambio de fase a martensita retenida (ver figura Nº42b, alrededor de 0,15 [%]).

4.3.1.3.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Media (T=T1=20 [ºC] aprox.) y Tamaño de Grano Grueso (d=d3)

En las figuras 43a, 43b y 43c se puede observar los resultados de los ensyos cíclicos a una amplitud de Deformación creciente.

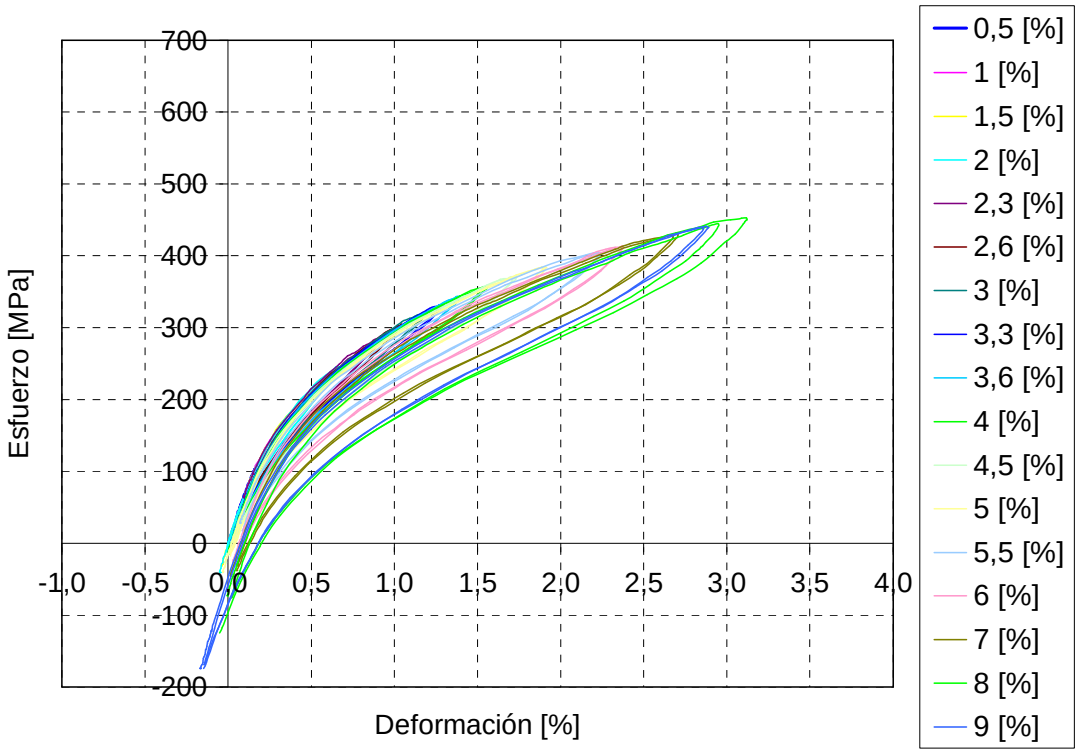


Figura Nº43a
Tipo de Ensayo: Cíclico Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d3, Grueso. Temperatura de ensayo: T1, Media. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 10

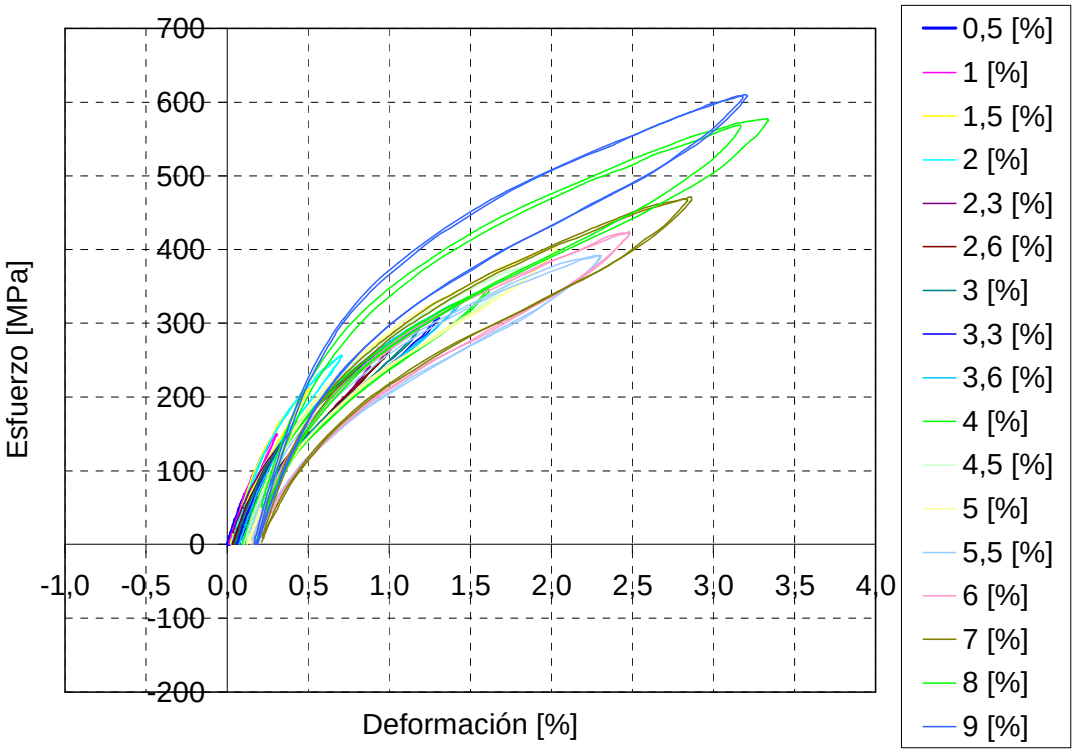


Figura Nº43b

Tipo de Ensayo: Cíclico Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d3, Grueso. Temperatura de ensayo: T1, Media. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 10

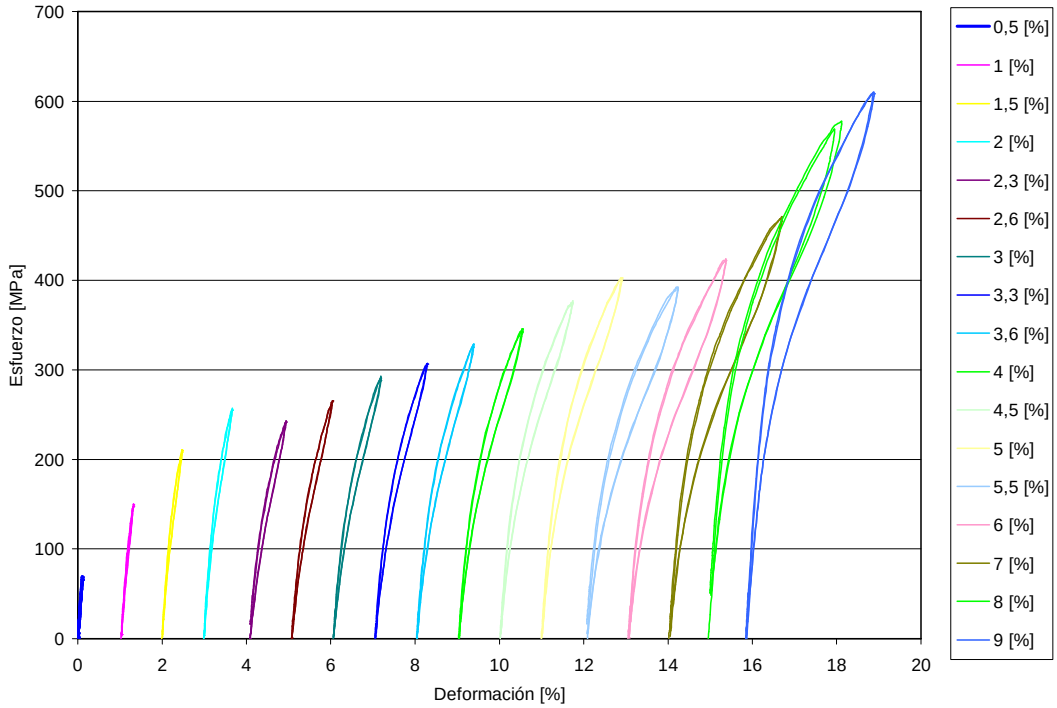


Figura Nº43c

Tipo de Ensayo: Cíclico Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d3, Grueso. Temperatura de ensayo: T1, Media. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 10

Como se puede ver en la figura Nº43c, el material se comporta efectivamente como una aleación superelástica para un Tamaño de Grano Grueso (d = d3 = 250 [μm]) y Temperatura de Ensayo Media (Temperatura Ambiente), Frecuencia de Oscilación de 1 [Hz] y 10 ciclos.

Durante las 17 deformaciones nominales impuestas (de 0,5 [%] a 9 [%] nominal, 0,2 [%] a 3,3 [%] real), la aleación no presentó deformación remanente considerable que indica cambio de fase a martensita retenida (ver figura Nº43b, alrededor de 0,15 [%]).

Para el ensayo a Temperatura de Ensayo Media, Tamaño de Grano Grueso, Frecuencia de Oscilación 1 [Hz] y 10 ciclos, se aplicaron 17 deformaciones nominales distintas, de 0,5 [%] a 9 [%] nominales o 0,2 [%] a 3,2 [%] reales con el fin de determinar la deformación máxima para el rango superelástico. Sin embargo, este no se determinó debido a que la probeta solo se deformó hasta 3,2 [%].

4.3.1.4.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Alta y Tamaño de Grano Fino

En las figuras 41a, 41b y 41c se puede observar los resultados de los ensyos cíclicos a una amplitud de Deformación creciente.

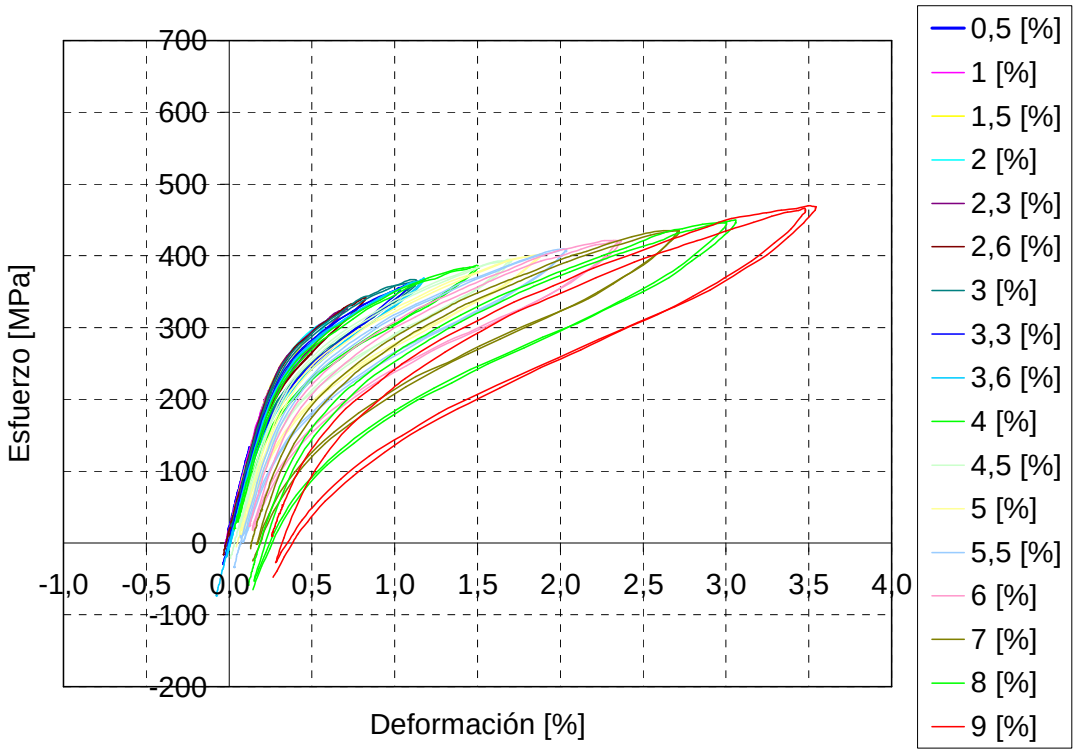


Figura Nº44a

Tipo de Ensayo: Cíclico Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d1, Fino. Temperatura de ensayo: T2, Alta. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 10

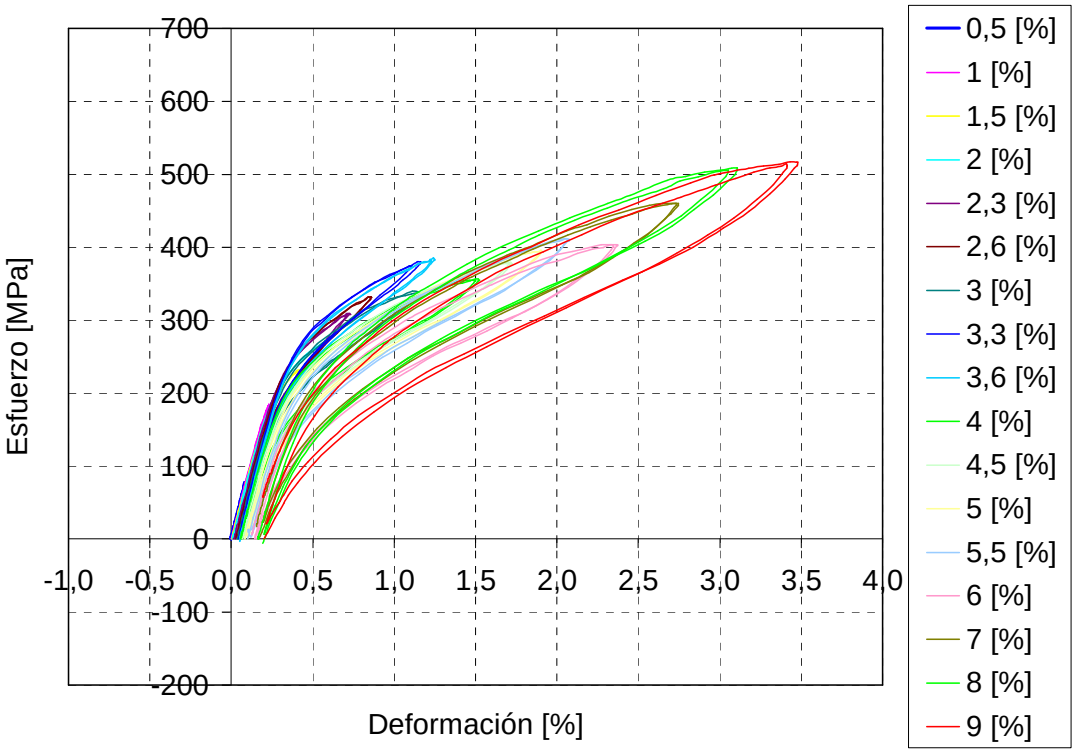


Figura Nº44b

Tipo de Ensayo: Cíclico Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d1, Fino. Temperatura de ensayo: T2, Alta. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 10

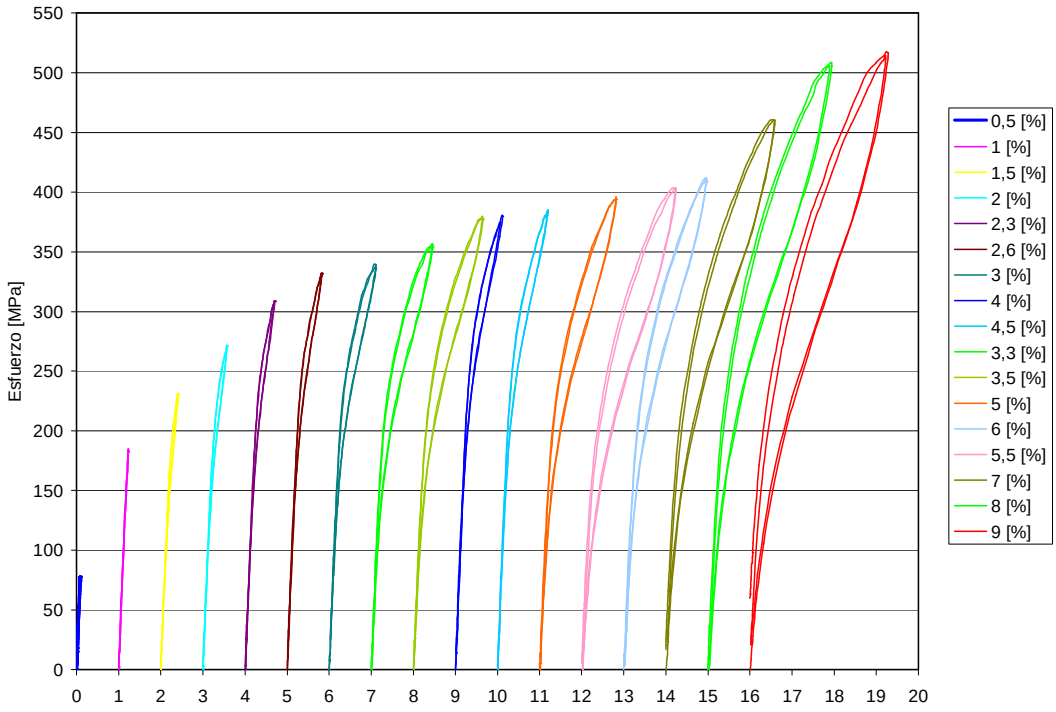


Figura Nº44c

Tipo de Ensayo: Cíclico Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d1, Fino. Temperatura de ensayo: T2, Alta. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 10

Como se puede ver en la figura Nº44c, el material se comporta efectivamente como una aleación superelástica para un Tamaño de Grano Fino (d = d1 = 64,5 [μm]) y Temperatura de Ensayo Alta (T = T2 = 50 [ºC]), Frecuencia de Oscilación de 1 [Hz] y 10 ciclos.

Durante las 17 deformaciones nominales impuestas (de 0,5 [%] a 9 [%] nominal, 0,2 [%] a 3,3 [%] real), la aleación no presentó deformación remanente considerable que indica cambio de fase a martensita retenida (ver figura Nº44b, alrededor de 0,15 [%]).

Para el ensayo a Temperatura de Ensayo Alta, Tamaño de Grano Fino, Frecuencia de Oscilación 1 [Hz] y 10 ciclos, se aplicaron 17 deformaciones nominales distintas, de 0,5 [%] a 9 [%] nominales o 0,2 [%] a 3,3 [%] reales con el fin de determinar la deformación máxima para el rango superelástico. Sin embargo, este no se determinó debido a que la probeta solo se deformó 3,3 [%], igual que en el 1er caso.

La diferencia entre la deformación Nominal y Real se acentuó debido a la alta temperatura de ensayo. El detalle de la discusión se encuentar en (*) al final del capítulo 4.3.1.6, página 84, el esfuerzo de fluencia aumenta con la temperatura, por lo que la deformación registrada por el extensómetro en la probeta es menor (ver figura Nº47)

4.3.1.5.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Alta y Tamaño de Grano Medio

En las figuras 45a, 45b y 45c se puede observar los resultados de los ensyos cíclicos a una amplitud de Deformación.

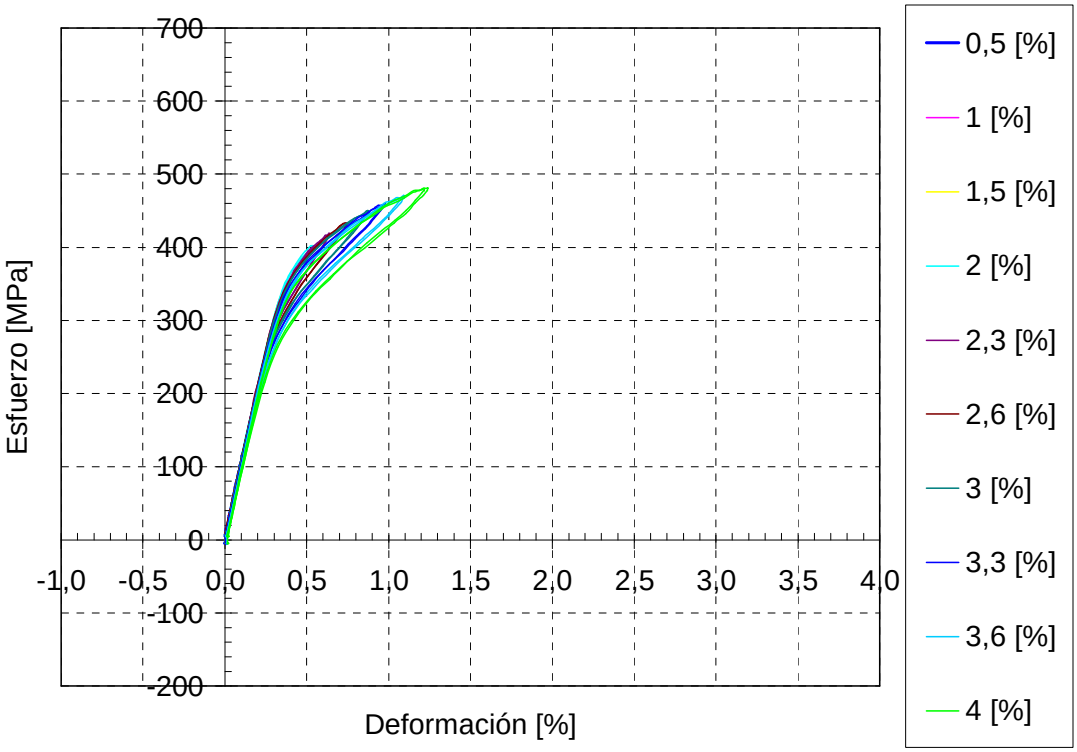


Figura Nº45a

Tipo de Ensayo: Cíclico Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d2, Medio. Temperatura de ensayo: T2, Alta. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 10

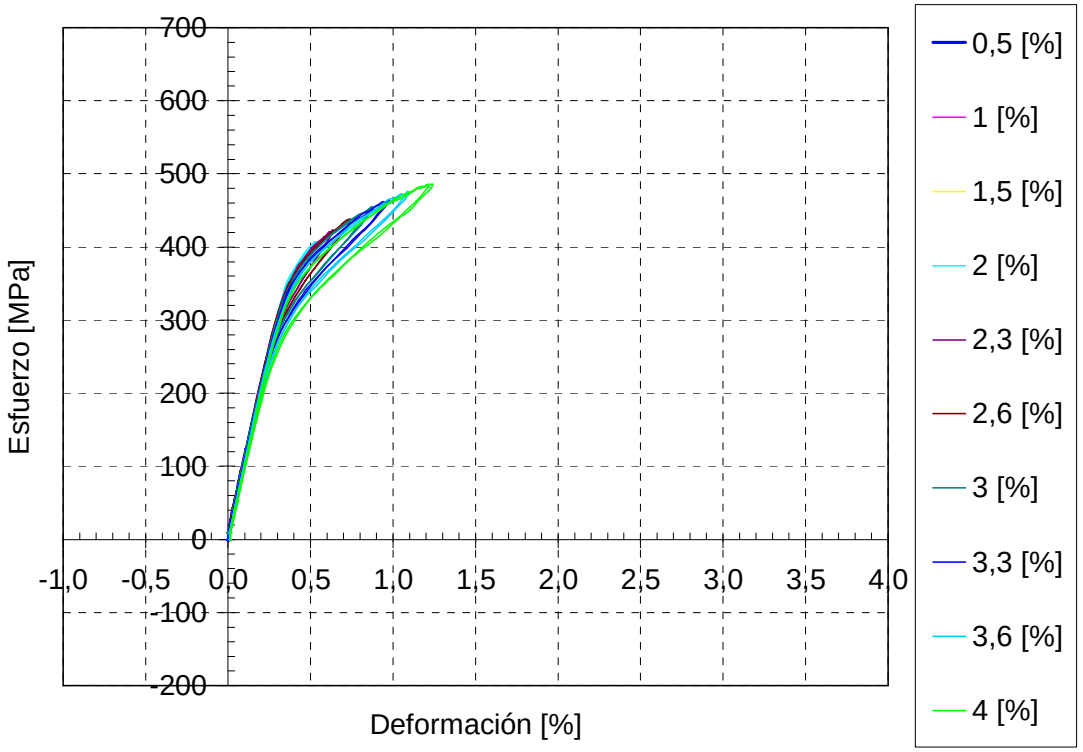


Figura Nº45b

Tipo de Ensayo: Cíclico Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d2, Medio. Temperatura de ensayo: T2, Alta. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 10

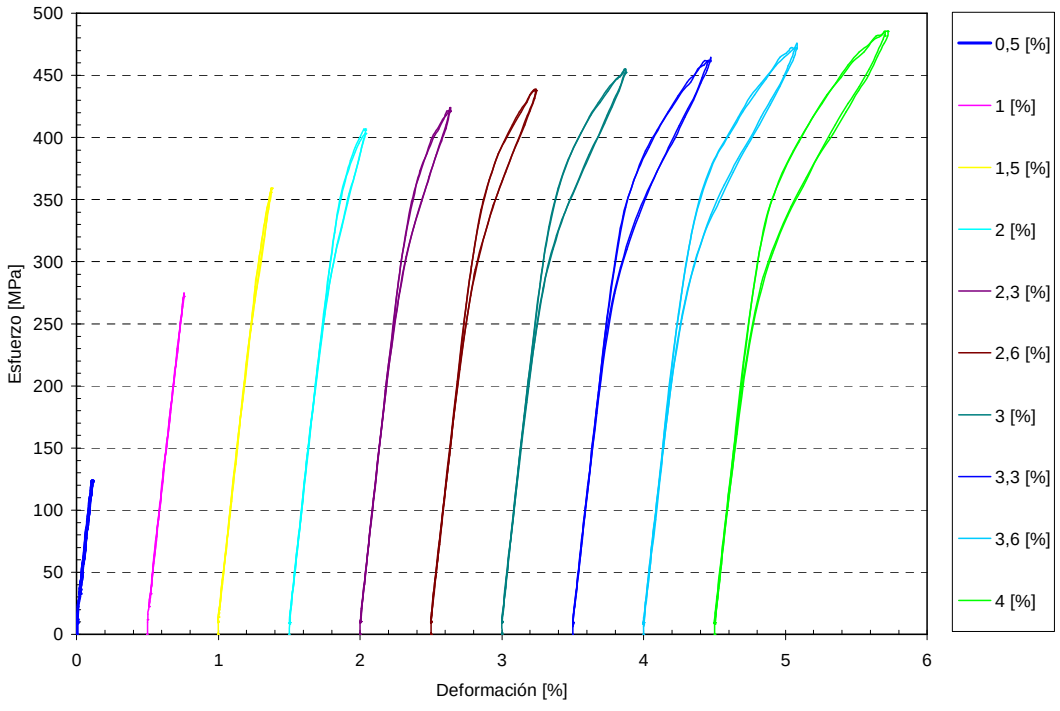


Figura Nº45c

Tipo de Ensayo: Cíclico Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d2, Medio. Temperatura de ensayo: T2, Alta. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 10

Como se puede ver en la figura Nº45c, el material se comporta efectivamente como una aleación superelástica para un Tamaño de Grano Medio (d = d2 = 95,2 [μm]) y Temperatura de Ensayo Alta (T = T2 = 50 [ºC]), Frecuencia de Oscilación de 1 [Hz] y 10 ciclos.

Durante las 10 deformaciones nominales impuestas (de 0,5 [%] a 4 [%] nominal, 0,2 [%] a 1,25 [%] real), la aleación no presentó deformación remanente considerable que indica cambio de fase a martensita retenida (ver figura Nº45b, alrededor de 0,15 [%]).

Para el ensayo a Temperatura de Ensayo Alta, Tamaño de Grano Medio, Frecuencia de Oscilación 1 [Hz] y 10 ciclos, se aplicaron 10 deformaciones nominales distintas, de 0,5 [%] a 4 [%] nominales o 0,2 [%] a 1,25 [%] reales con el fin de determinar la deformación máxima para el rango superelástico. Sin embargo, este no se determinó debido a que la probeta solo se deformó 1,3 [%].

4.3.1.6.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Alta (T=T2=50 [ºC] aprox.) y Tamaño de Grano Grueso (d=d3)

En las figuras 46a, 46b y 46c se puede observar los resultados de los ensyos cíclicos a una amplitud de Deformación creciente.

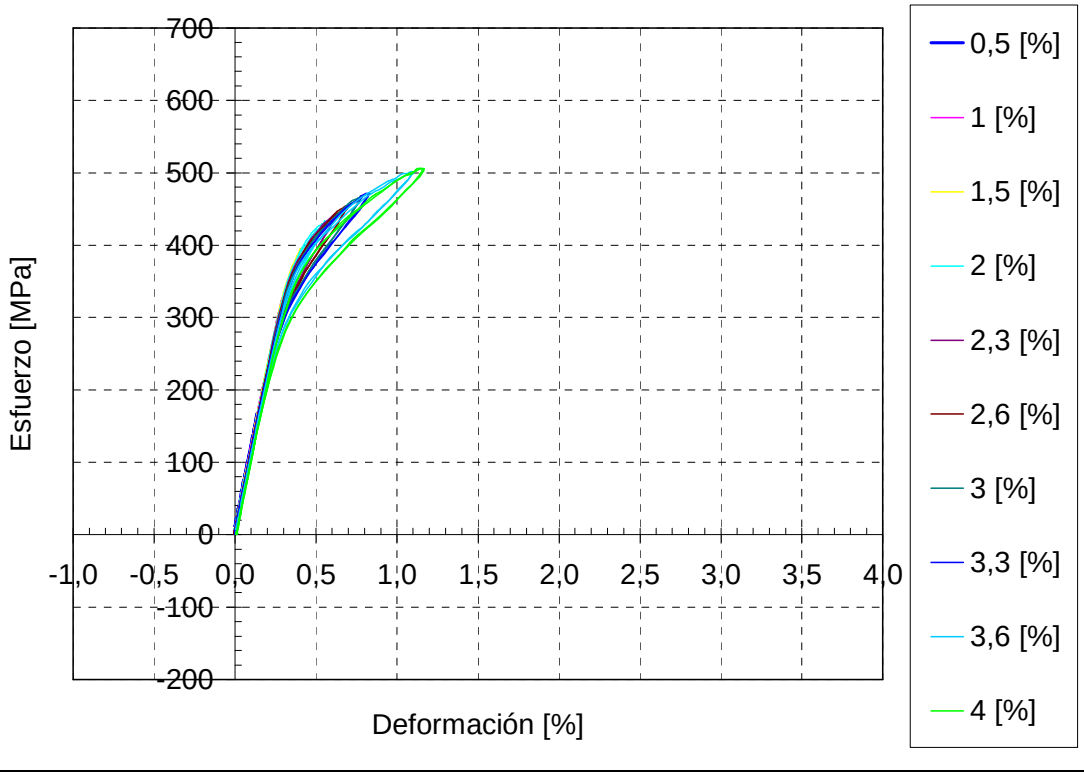


Figura Nº46a

Tipo de Ensayo: Cíclico Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d3, Grueso. Temperatura de ensayo: T2, Alta. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 10

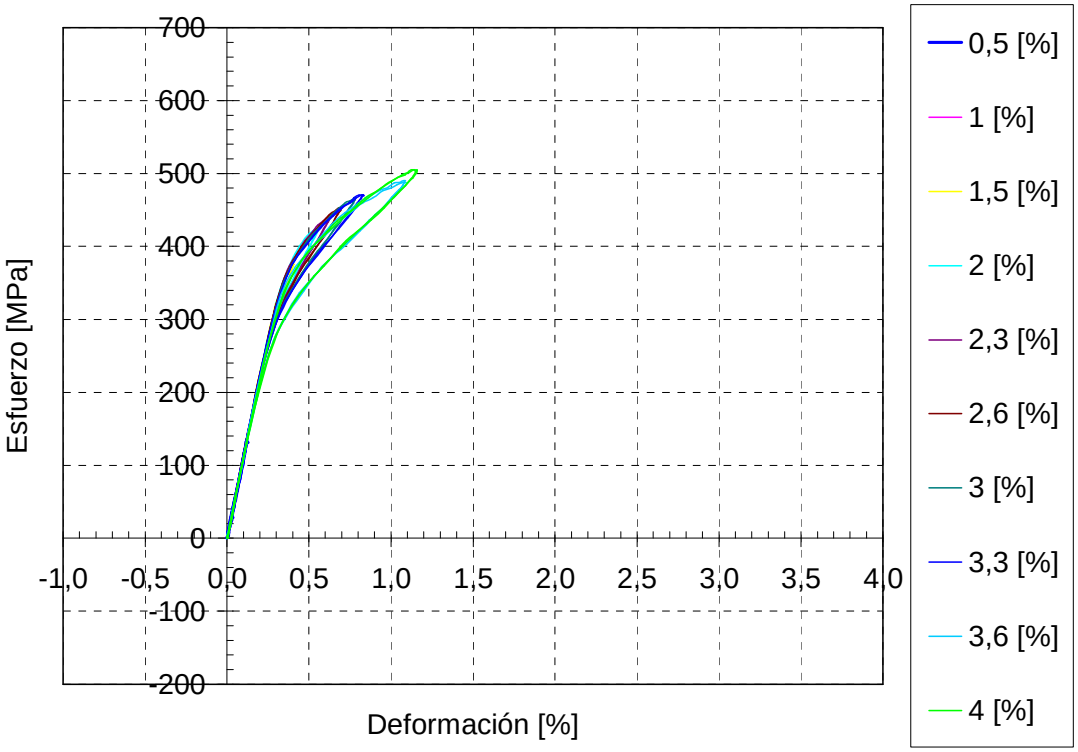


Figura Nº46b

Tipo de Ensayo: Cíclico Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d3, Grueso. Temperatura de ensayo: T2, Alta. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 10

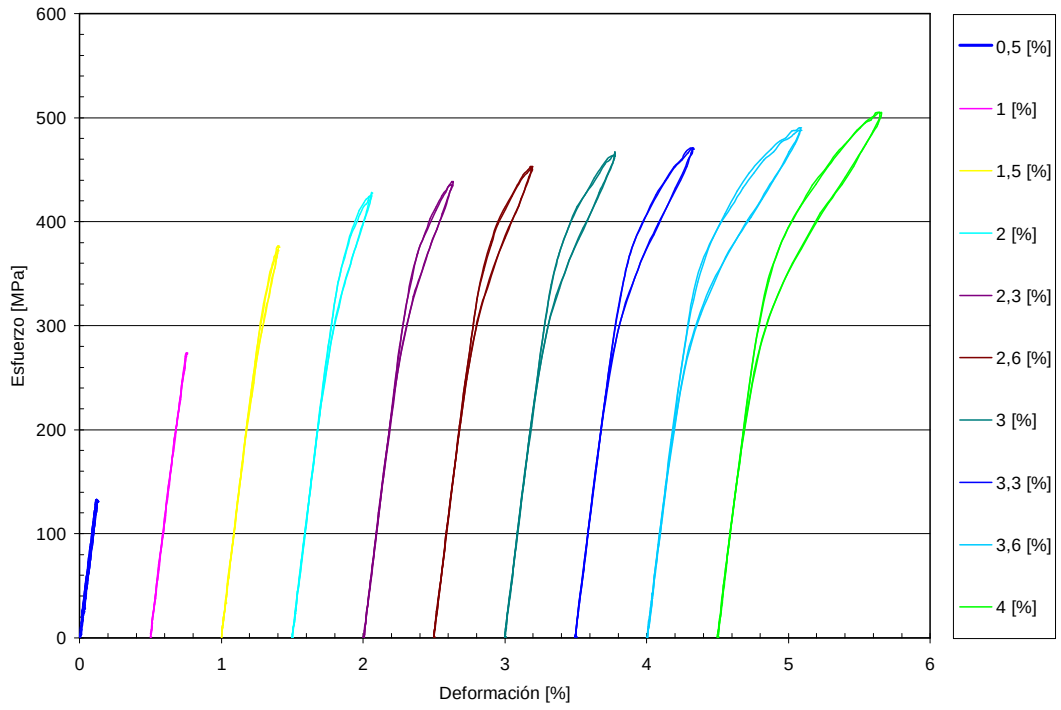


Figura Nº46c

Tipo de Ensayo: Cíclico Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d3, Grueso. Temperatura de ensayo: T2, Alta. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz] Número de Ciclos: 2

Como se puede ver en la figura Nº46c, el material se comporta efectivamente como una aleación superelástica para un Tamaño de Grano Grueso (d = d3 = 250 [μm]) y Temperatura de Ensayo Alta (T = T2 = 50 [ºC]), Frecuencia de Oscilación de 1 [Hz] y 10 ciclos.

Durante las 10 deformaciones nominales impuestas (de 0,5 [%] a 4 [%] nominal, 0,2 [%] a 1,2 [%] real), la aleación no presentó deformación remanente considerable que indica cambio de fase a martensita retenida (ver figura Nº46b, alrededor de 0,15 [%])

Para el ensayo a Temperatura de Ensayo Alta, Tamaño de Grano Grueso, Frecuencia de Oscilación 1 [Hz] y 10 ciclos, se aplicaron 10 deformaciones nominales distintas, de 0,5 [%] a 4 [%] nominales o 0,2 [%] a 1,2 [%] reales con el fin de determinar la deformación máxima para el rango superelástico. Sin embargo, este no se determinó debido a que la probeta solo se deformó 1,2 [%].

(*) Discusión[5]

La deformación impuesta (nominal) no coincide con la deformación real de la probeta ensayada. Esto se debe a que el algoritmo de programación para los ensayos cíclicos es a "deformación controlada" en el cabezal, traduciéndose en el recorrido del cabezal de la máquina cíclica. Los parámetros de entrada del programa son: distancia entre mordazas (L[mm]), distancia del extensómetro (l[mm]), diámetro de la probeta (D[mm]), frecuencia de oscilación (f[hz]), número de ciclos (n), amplitud máxima [%] y amplitud mínima [%][6]. Luego, la amplitud mínima se traduce en una predeformación para minimizar errores iniciales en el asentamiento de la probeta en las mordazas. Al ingresar la deformación máxima requerida, el programa traduce este porcentaje, según largo de la probeta memdido entre mordazas, en el recorrido necesario del cabezal de la máquina, pero no considera la deformación de la máquina, por lo que el extensómetro solo registra parte de esta deformación. Este algoritmo fue configurado como una forma de seguridad del extensómetro, el debido a que en ensayos de compresión, si la probeta se resbala con respecto al extensómetro, la máquina podría seguir comprimiendo con la probabilidad de romper dicho instrumento. A este último algoritmo, cuando la máquina usa el extensómetro como sensor se le llama ensayo a "carga controlada".

[5] Esta Discusión es válida para todos los ensayos cíclicos debido a que es el algoritmo usado para determinar los valores de esfuerzo v/s deformación.
[6] El algoritmo para calcular los esfuerzos v/s deformación se encuentra en el Anexo B

Una forma de representar lo que ocurre con la deformación entre la máquina y la probeta es simularlos con resortes:

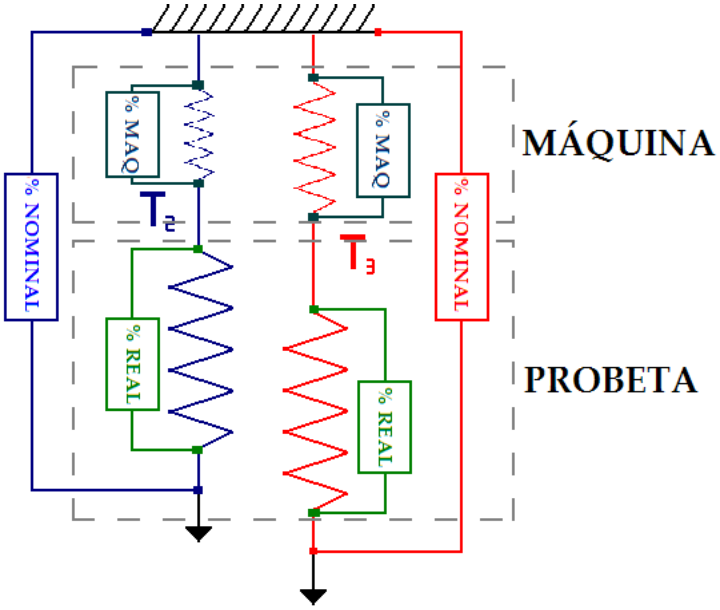


Figura Nº47
Diagrama análogo a la deformación registrada por instrumento.
%REAL: deformación que registra el extensómetro.
%MAQ: deformación que experimenta la máquina.
%NOMINAL: deformación impuesta al cabezal.

4.3.2.- Resultado: Deformación Relativa de los ciclos de deformación para 10 ciclos.

Dado los gráficos de los ensayos cíclicos a las Temperaturas de Ensayo Media y Alta, y Tamaño de Grano Fino, Medio y Grueso, se calcularon las deformaciones relativas de cada curva, considerando la Deformación Máxima, la Deformación Inicial y la Deformación Inicial sin considerar el primer ciclo. Así se definen 3 tipos de deformaciones:

1. Deformación I: se define como la deformación máxima que se produce en el ensayo cíclico.

2. Deformación II: se define como la diferencia entre la deformación máxima y la deformación inicial del primer ciclo.

3. Deformación III: se define como la diferencia entre la deformación máxima y la deformación inicial del segundo ciclo.

A continuación se grafica lo antes explicado:

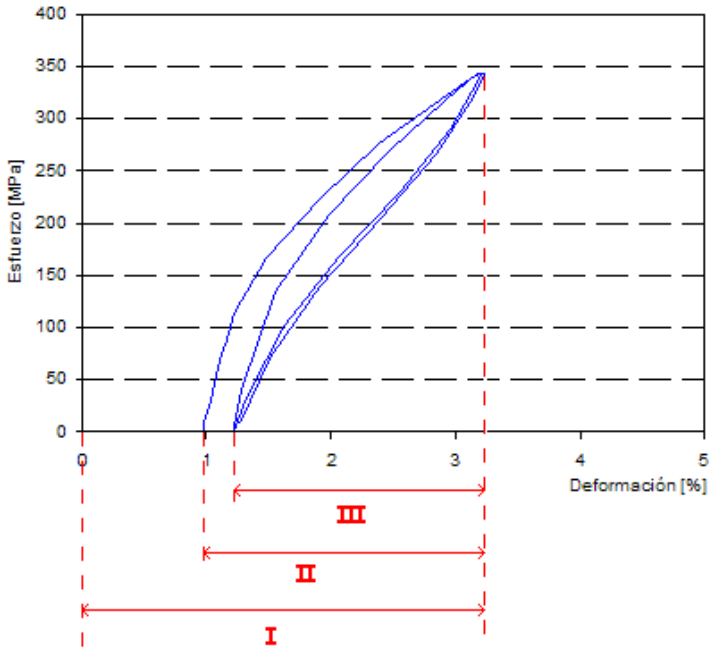


Figura Nº48
Figura esquemática para las Deformaciones I, II y III aplicable a cada ciclo.

Los Resultados obtenidos para los ensayos cíclicos para las distintas Temperaturas y Tamaños de Grano considerados se resumen en las Tablas Nº 6 y 7.

4.3.2.1.- Deformaciones I, II y III para Ensayos Cíclicos a Deformación Creciente

En la Tablas Nº 6 y 7 se presentan, para las Temperaturas T1 y T2 respectivamente, los valores de las Deformaciones I, II y III para ciclos con deformación nominal y creciente. En cada caso se exponenlos resultados para los distintos Tamaños de Grano d1, d2 y d3.

Tabla Nº6

"Deformación Relativa para Temperatura de Ensayo Media (T1) y Tamaño de Grano Fino (d1), Medio (d2) y Grueso (d3)"

Temp de Ensayo [ºC]		**Media, T1**								
Tamaño de Grano		**Fino, d1**			**Medio, d2**			**Grueso, d3**		
Defeformación [%]		**I**	**II**	**III**	**I**	**II**	**III**	**I**	**II**	**III**
Deformación Nominal [%]	**0,5**	0,22	0,30	0,19	0,24	0,23	0,16	0,11	0,16	0,10
	1	0,44	0,45	0,41	0,55	0,52	0,42	0,31	0,32	0,28
	1,5	0,81	0,83	0,77	0,93	0,84	0,78	0,50	0,52	0,47
	2	1,58	1,57	1,52	1,31	1,25	1,18	0,70	0,71	0,66
	2,3	1,64	1,61	1,54	1,52	1,51	1,46	0,87	0,84	0,84
	2,6	1,87	1,84	1,75	1,83	1,78	1,75	0,99	0,99	0,94
	3	2,25	2,19	2,11	2,12	2,11	2,11	1,17	1,14	1,11
	3,3	2,63	2,52	2,46	2,32	2,30	2,30	1,29	1,26	1,21
	3,6	2,78	2,66	2,58	2,53	2,50	2,50	1,42	1,38	1,33
	4	3,07	2,91	2,86	2,82	2,79	2,78	1,59	1,53	1,48
	4,5	-	-	-	-	-	-	1,81	1,73	1,68
	5	-	-	-	-	-	-	2,02	1,92	1,88
	5,5	-	-	-	-	-	-	2,30	2,15	2,14
	6	-	-	-	-	-	-	2,48	2,34	2,30
	7	-	-	-	-	-	-	2,86	2,69	2,65
	8	-	-	-	-	-	-	3,34	3,13	3,10
	9	-	-	-	-	-	-	3,21	3,05	3,03

Tabla Nº7

"Deformación Relativa para Temperatura de Ensayo Alta (T2) y Tamaño de Grano Fino (d1), Medio (d2) y Grueso (d3)"

Temp de Ensayo [ºC]		Alta, T2								
Tamaño de Grano		Fino, d1			Medio, d2			Grueso, d3		
Deformación [%]		I	II	III	I	II	III	I	II	III
Deformación Nominal [%]	**0,5**	0,09	0,13	0,09	0,11	0,11	0,09	0,12	0,14	0,10
	1	0,20	0,23	0,19	0,26	0,26	0,25	0,27	0,31	0,27
	1,5	0,41	0,43	0,40	0,38	0,38	0,38	0,39	0,39	0,39
	2	0,56	0,60	0,55	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
	2,3	0,65	0,66	0,63	0,63	0,64	0,64	0,61	0,61	0,61
	2,6	0,78	0,78	0,74	0,74	0,74	0,74	0,68	0,68	0,68
	3	0,99	0,96	0,92	0,87	0,87	0,87	0,76	0,76	0,76
	3,3	0,99	0,96	0,93	0,96	0,96	0,96	0,81	0,81	0,81
	3,6	1,11	1,13	1,06	1,08	1,07	1,07	1,08	1,08	1,07
	4	1,44	1,40	1,38	1,22	1,20	1,20	1,13	1,13	1,13
	4,5	1,64	1,61	1,56	-	-	-	-	-	-
	5	1,83	1,76	1,73	-	-	-	-	-	-
	5,5	1,97	1,91	1,87	-	-	-	-	-	-
	6	2,33	2,20	2,18	-	-	-	-	-	-
	7	2,64	2,48	2,45	-	-	-	-	-	-
	8	3,02	2,85	2,82	-	-	-	-	-	-
	9	3,46	3,26	3,24	-	-	-	-	-	-

Los ensayos cíclicos de la aleación en estudio a Temperatura de Ensayo Media y Tamaño de Grano Grueso se realizaron hasta una deformación nominal impuesta del 9 [%]. Esto tuvo el objetivo de detectar el límite superelástico de la aleación.

Los ensayos cíclicos de la aleación en estudio a Temperatura de Ensayo Alta y Tamaño de Grano Fino se realizaron hasta una deformación nominal impuesta del 9 [%]. Esto tuvo el objetivo de detectar el límite superelástico de la aleación.

En ambos casos, no se logró encontrar el límite superelástico debido a la gran diferencia entre la deformación nominal y real. La relación entre la deformación nominal y real es 3:1 aproximadamente. Así, la deformación no sobrepasó 3,5 [%] de deformación real.

4.3.2.2.- Gráficos de Deformaciones I, II y III para Ensayos Cíclicos a Deformación Creciente

En las Figuras Nº 49 y 50, se representan las Deformaciones II y III en función de la Deforación I para cada pareja Temperatura-Tamaño de Grano. Notar que la diferencia Δ=Deformación III – Deformación II, correponde a la deformación remanente asociada ala serie bajo análisis. Como en todas estas figuras est diferencia se mantiene constante, se puede deicir que en el rango de deformaciones estudiados siempre se estuvo en el rango superelástico.

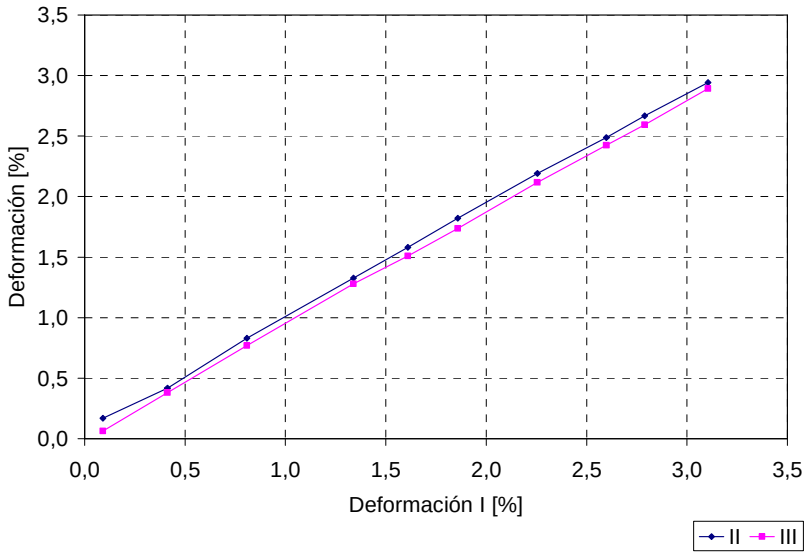


Figura Nº49a
Con color rojo Deformación II v/s Deformación I. Con color azul Deformación III v/s Deformación I. Ambas relaciones para una Temperatura de ensayo Media T1 y Tamaño de Granos Fino d1.

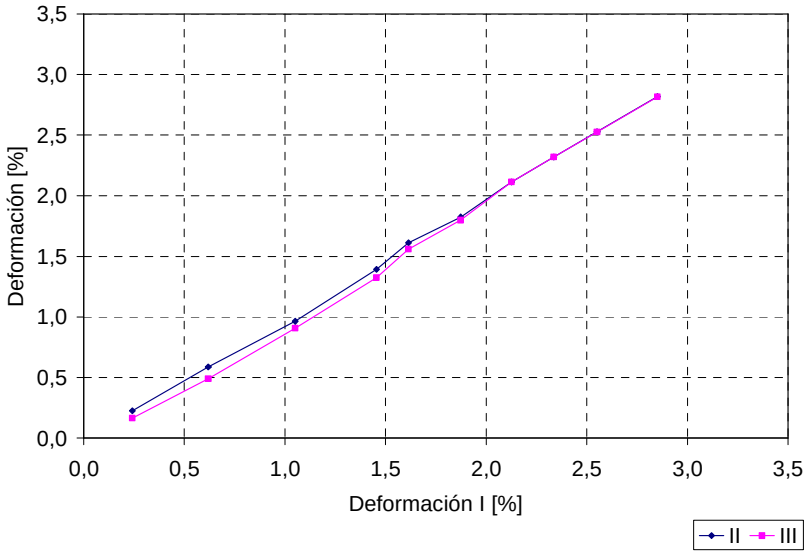


Figura Nº49b
Con color rojo Deformación II v/s Deformación I. Con color azul Deformación III v/s Deformación I. Ambas relaciones para una Temperatura de ensayo Media T1 y Tamaño de Granos Medio d2.

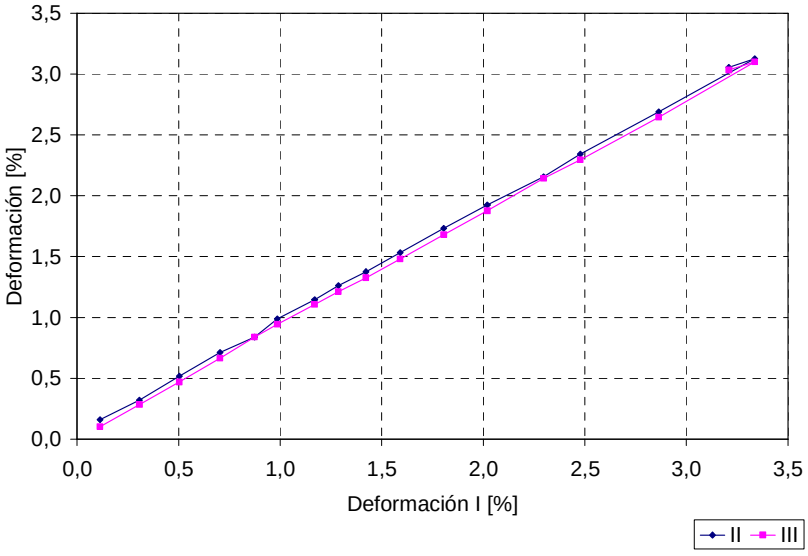


Figura Nº49c
Con color rojo Deformación II v/s Deformación I. Con color azul Deformación III v/s Deformación I. Ambas relaciones para una Temperatura de ensayo Media T1 y Tamaño de Granos Grueso d3.

Según los gráficos de la figura Nº49a, 49b y 49c no hay deformación remanente en los ensayos cíclicos para la aleación en estudio, Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be, a Temperatura de Ensayo Media (Ambiental) y Tamaño de Grano Fino, Medio y Grueso, por lo tanto, la aleación se comportó de forma superelástica bajo el rango de deformación nominal impuesta. De existir deformación remanente las curvas se separarían en forma prominente, pues indica el momento en que la aleación no vuelve a su forma original.

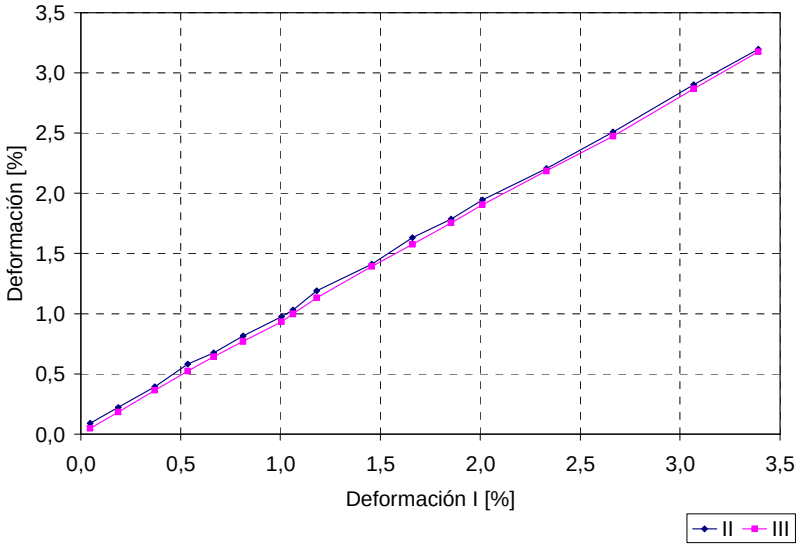


Figura Nº50a
Con color rojo Deformación II v/s Deformación I. Con color azul Deformación III v/s Deformación I. Ambas relaciones para una Temperatura de ensayo Alta T2 y Tamaño de Granos Fino d1.

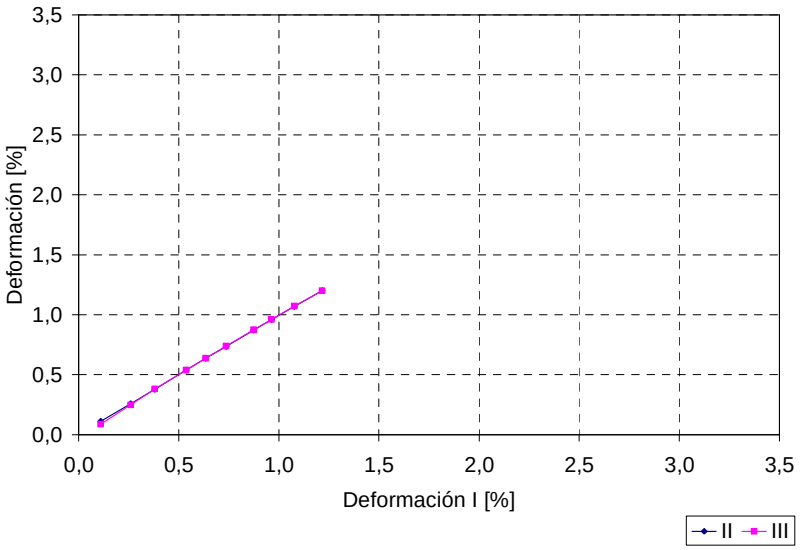


Figura Nº50b
Con color rojo Deformación II v/s Deformación I. Con color azul Deformación III v/s Deformación I. Ambas relaciones para una Temperatura de ensayo Alta T2 y Tamaño de Granos Medio d2.

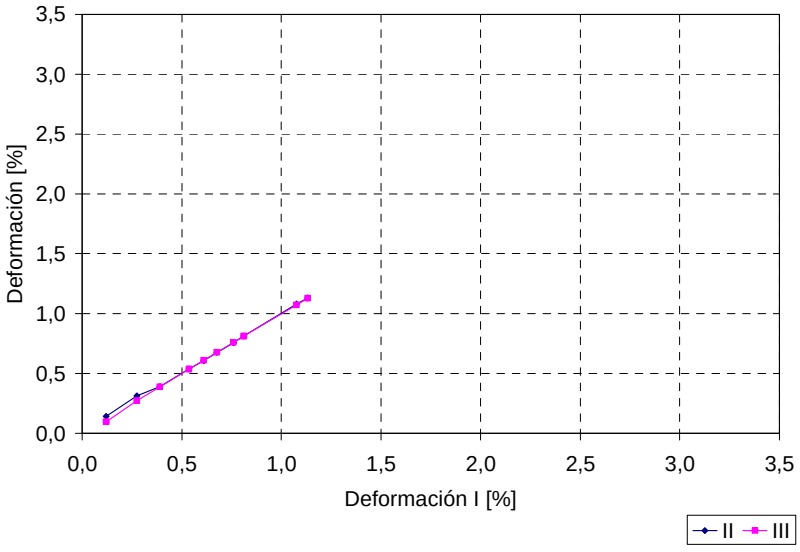


Figura Nº50c
Con color rojo Deformación II v/s Deformación I. Con color azul Deformación III v/s Deformación I. Ambas relaciones para una Temperatura de ensayo Alta T2 y Tamaño de Granos Grueso d3.

Según los gráficos de la figura Nº50a, 50b y 50c, no hay deformación remanente en los ensayos cíclicos para la aleación en estudio, Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be, a Temperatura de Ensayo Alta y Tamaño de Grano Fino, Medio y Grueso, por lo tanto, la aleación se comportó de forma superelástica bajo el rango de deformación nominal impuesta. De existir deformación remanente las curvas se separarían en forma prominente, pues indica el momento en que la aleación no vuelve a su forma original.

Estas observaciones son consistentes con aquellas previamente estudiadas como parte de los análisis de antecedentes. Los autores de dicha publicación son Susana Montecinos, María O. Moroni y Aquiles Sepúlveda, donde se da a conocer un límite superelástico entre ___ y ____ par esta misma aleación Cu-Al-Be con un tamaño de Grano de _____, a la Temperatura de ____ y a la frecuecia de 1 [Hz].

4.3.2.3.- Límite Inferior del Límite Superelástico

En la Tabla Nº 8 se muestran las deformaciones reales que se ensayaron. Recordar que no hubo deformación remanente para las deformaciones ensayadas, por lo que no se detectó el límite elástico..

Tabla Nº8
"Deformaciones Reales"

Deformación						
Nominal	Temperatura T1			Temperatura T2		
	d1	d2	d3	d1	d2	d3
	Real	Real	Real	Real	Real	Real
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0,50	0,22	0,24	0,16	0,09	0,11	0,14
1,00	0,54	0,63	0,32	0,23	0,26	0,29
1,50	0,93	1,04	0,48	0,42	0,38	0,41
2,00	1,55	1,44	0,71	0,58	0,54	0,55
2,30	1,72	1,62	0,94	0,73	0,64	0,62
2,60	2,06	1,89	1,04	0,86	0,74	0,68
3,00	2,40	2,14	1,04	1,15	0,88	0,77
3,30	2,68	2,35	1,29	1,16	0,98	0,83
3,60	2,95	2,59	1,4	1,24	1,09	1,09
4,00	3,26	2,9	1,56	1,52	1,24	1,17
			1,73	1,72		
			1,91	1,91		
			2,24	2,05		
			2,37	2,33		
			2,65	2,73		
			2,86	3,05		
			2,95	3,41		

Dado que las curvas de Deformación II y III con respecto a I son casi coincidentes y no se visualizó una separación considerable entre ellas, se concluye que la aleación no experimentó deformación remanente. Así, en el rango de deformación trabajado (9 [%] nominal, lo que equivale a una deformación real de 3 [%] aproximadamente) se mantuvo el comportamiento superelástico de la aleación.

4.3.2.4.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Media (T1) y Alta (T2), y Tamaño de Grano (d1), Fino (d2), Medio y Grueso (d3)

En la siguiente figura se muestra las curvas de esfuerzo-deformación para los distintos Tamaños de Grano y Temperatura de ensayo para una frecuencia de oscilación de 1 [Hz] y 10 ciclos.

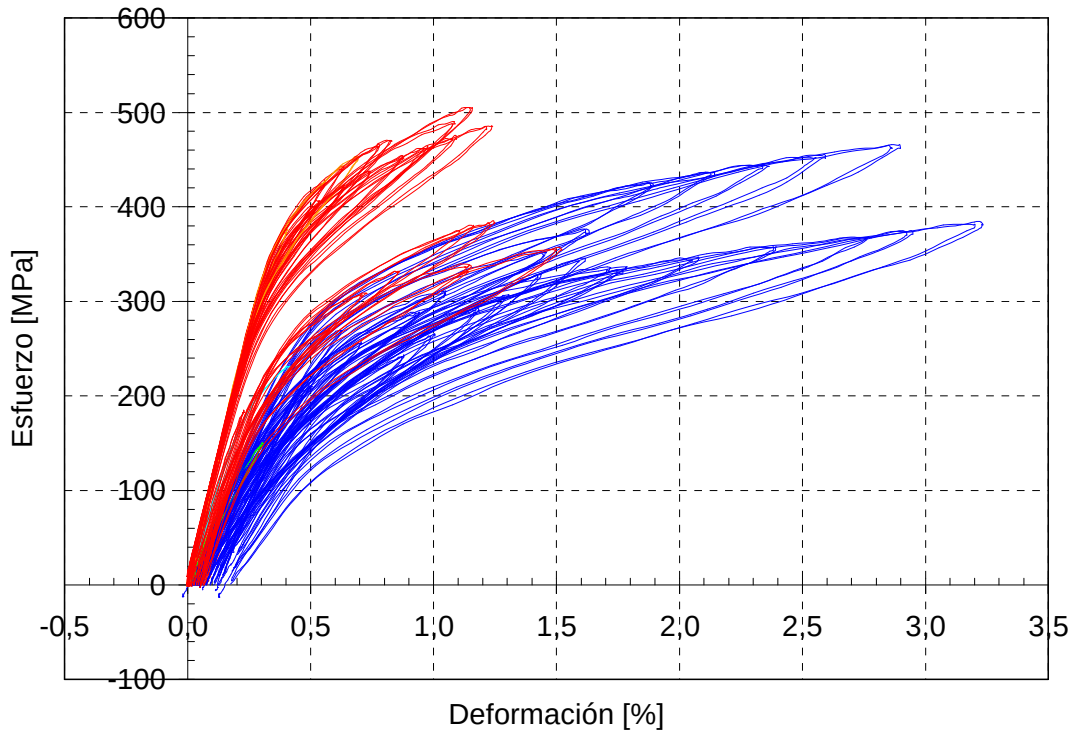


Figura Nº51

Tipo de Ensayo: Cíclico, Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be, Tamaño de Grano: d1,d2 y d3, Temperatura de ensayo: T1 y T2, Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz], Número de Ciclos: 2

4.3.2.5.- Conclusión

El material en estudio se comportó como una aleación superelástica en el rango de deformación ensayada (hasta 3,3 [%] de deformación real), temperatura de ensayo de 20 [ºC] y 50 [ºC], 1 [Hz] de frecuencia y 10 ciclos.

A temperaturas mayores de ensayo, el material experimenta esfuerzos máximos mayores. Esto se debe a la relación directa entre la Temperatura y Esfuerzo de Fluencia.

El Tamaño de Grano promedio incide en el comportamiento de la aleación. A medida que el tamaño de grano en la aleación disminuye, el comportamiento del material se ajusta a lo teóricamente predecible. Esto se debe a la homogenización de la estructura interna de la aleación.

4.3.3.- Resultado: Curva envolvente

La Curva Envolvente se define como aquella curva formada por los puntos máximos de los ensayos cíclicos a distintas deformaciones nominales impuestas. Esta curva es importante para coMParar los resultados de los ensayos de tracción y cíclicos.

Los resultados son los siguientes:

4.3.3.1.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Media y Alta, Tamaño de Grano Fino, Medio y Grueso

- Ensayos Cíclicos a temperatura Ambiente y Tamaño de Grano Fino, Medio y Grueso.

En las Figuras Nº 52a, 52b y 52c se muestran los ensayos cíclicos con la curva envolvente para 20 [ºC] a 1 [Hz], y d=d1, d2 y d3 para distintos valores de deformación.

- Ensayos Cíclicos a temperatura Alta y Tamaño de Grano Fino, Medio y Grueso.

En las Figuras Nº 53a, 53b y 53c se muestran los ensayos cíclicos con la curva envolvente para 50 [ºC] a 1 [Hz], y d=d1, d2 y d3 para distintos valores de deformación.

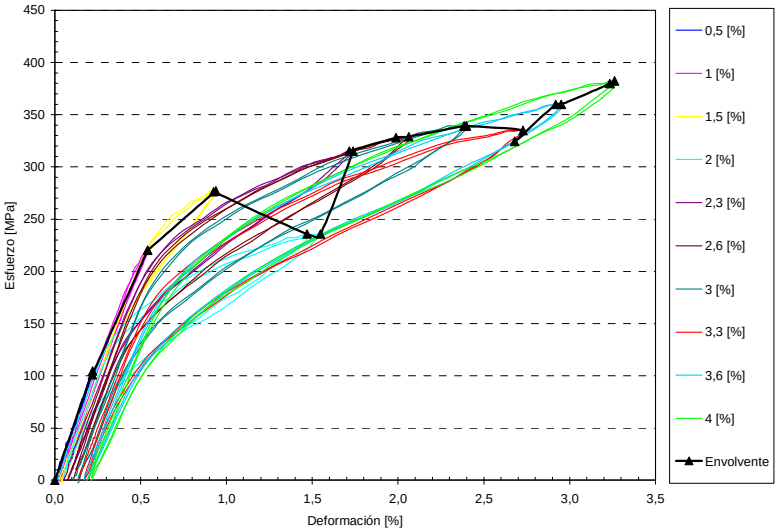


Figura Nº52a
Curva envolvente
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d1, Fino.
Temperatura de ensayo: T1, Media.
Amplitud de Deformación: 5 [%]
Número de Ciclos: 2

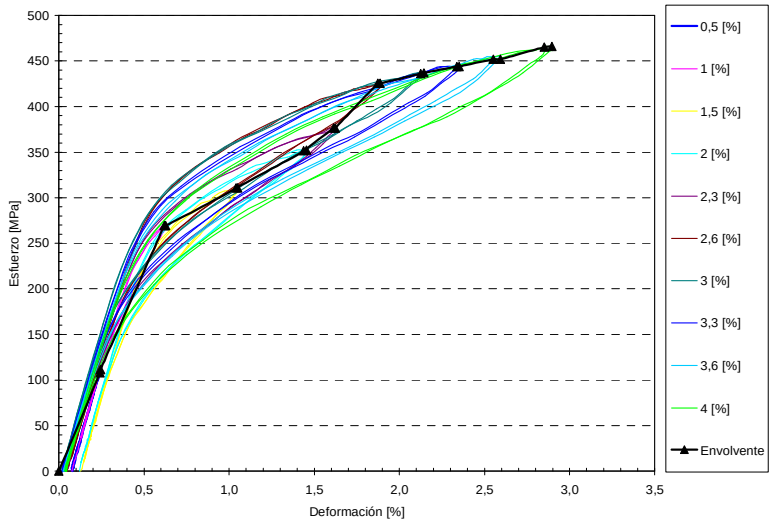


Figura Nº52b
Curva envolvente
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d2, Medio.
Temperatura de ensayo: T1, Media.
Amplitud de Deformación: 5 [%]
Número de Ciclos: 2

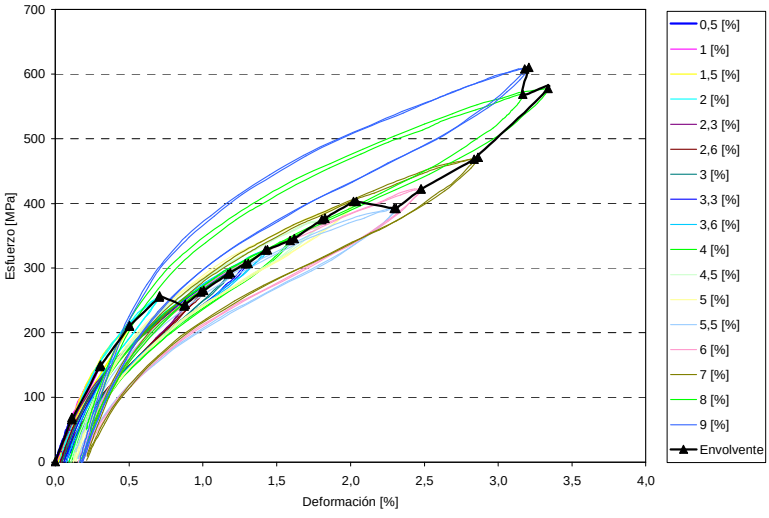


Figura Nº52c
Curva envolvente
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d3, Grueso.
Temperatura de ensayo: T1, Media.
Amplitud de Deformación: 5 [%]
Número de Ciclos: 2

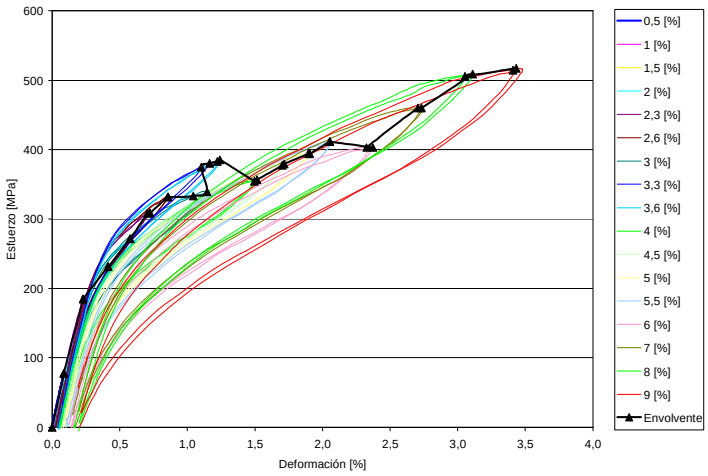


Figura Nº53a
Curva envolvente
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d1, Fino.
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Amplitud de Deformación: 5 [%]
Número de Ciclos: 2

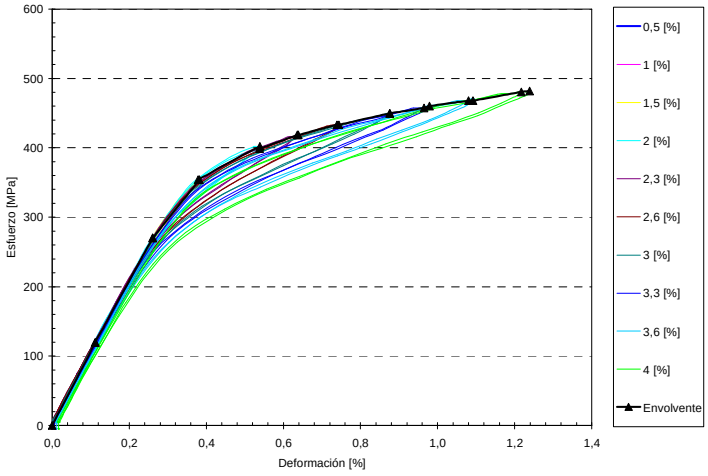


Figura Nº53b
Curva envolvente
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d2, Medio.
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Amplitud de Deformación: 5 [%]
Número de Ciclos: 2

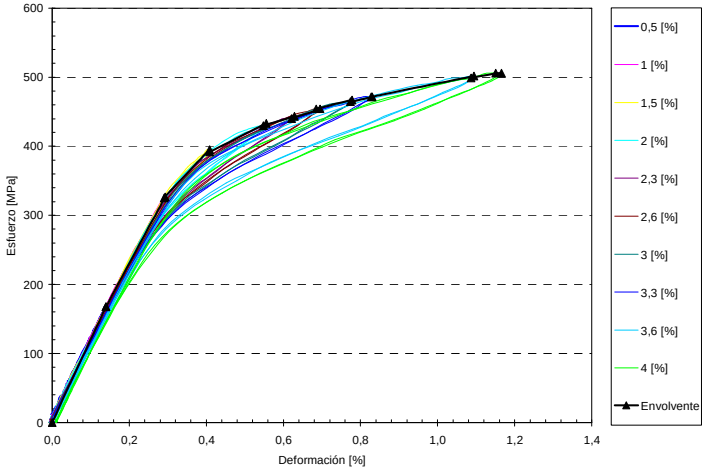


Figura Nº53c
Curva envolvente
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d3, Grueso.
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Amplitud de Deformación: 5 [%]
Número de Ciclos: 2

4.3.3.2.- Envolvente – Tracción a Temperatura Media y Alta, Tamaño de Grano Fino, Medio y Grueso

- Ensayos Cíclicos a temperatura Ambiente y Tamaño de Grano Fino, Medio y Grueso.

En las Figuras Nº 54a, 54b y 54c se muestran los ensayos cíclicos con la curva envolvente para 20 [ºC] a 1 [Hz], y d=d1, d2 y d3 para distintos valores de deformación.

- Ensayos Cíclicos a temperatura Alta y Tamaño de Grano Fino, Medio y Grueso.

En las Figuras Nº 55a, 55b y 55c se muestran los ensayos cíclicos con la curva envolvente para 50 [ºC] a 1 [Hz], y d=d1, d2 y d3 para distintos valores de deformación.

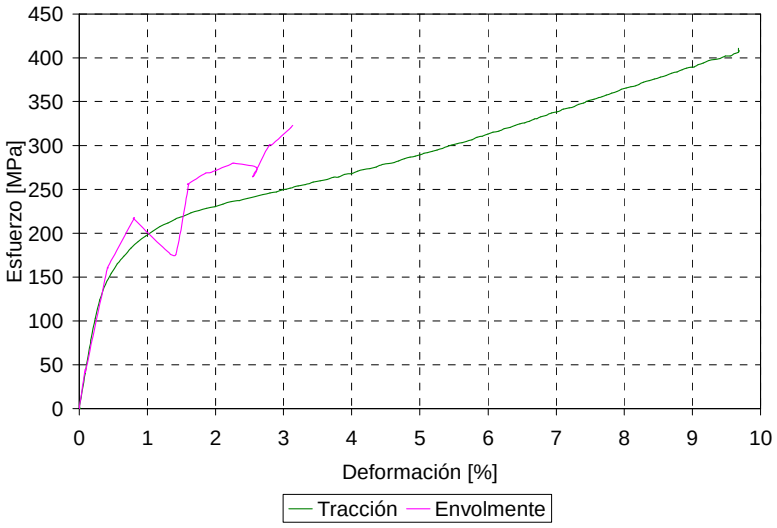


Figura Nº54a
Curva envolvente
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d1, Fino.
Temperatura de ensayo: T1, Media.
Amplitud de Deformación: 5 [%]
Número de Ciclos: 2

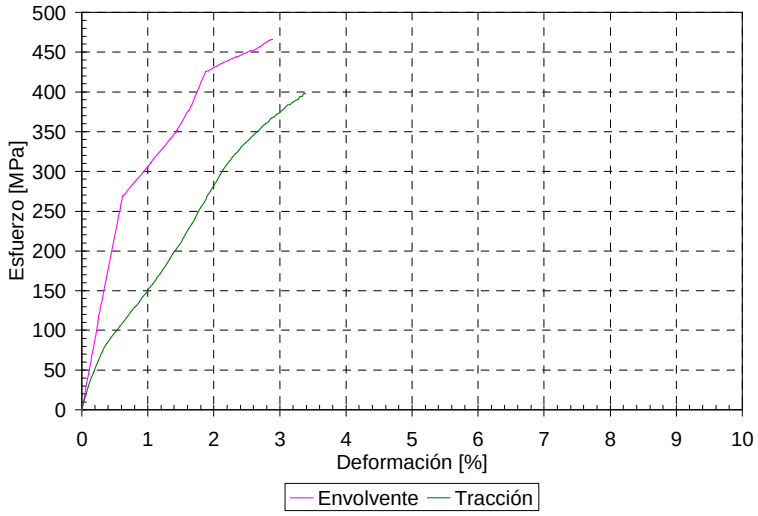


Figura Nº54b
Curva envolvente
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d2, Medio.
Temperatura de ensayo: T1, Media.
Amplitud de Deformación: 5 [%]
Número de Ciclos: 2

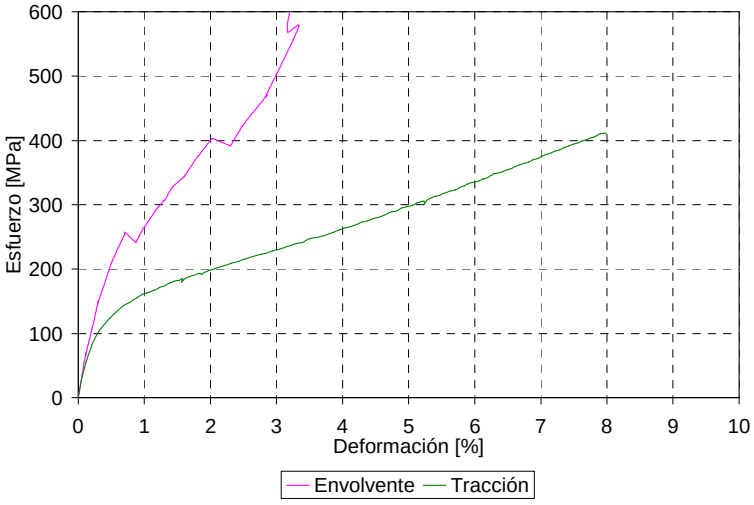


Figura Nº54c
Curva envolvente
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d3, Grueso.
Temperatura de ensayo: T1, Media.
Amplitud de Deformación: 5 [%]
Número de Ciclos: 10

En las figuras Nº54a y 54c se observan que el ensayo de tracción monotónico y el ensayo cíclico poseen el mismo rango elástico austenítico, lo que significa que poseen el mismo módulo elástico o de Young E, mientrs que en la figura Nº54b se puede observar que el ensayo de tracción monotónico y el ensayo cíclico no poseen el mismo rango elástico.

En la Figura Nº54a se observa que el comportamiento de ambas curvas en el rango plástico, tienen la misma tendencia, a pesar de que en el Ensayo cíclico existen variaciones.

Para la Figura Nº54a, el rango de deformación del Ensayo cíclico no es igual al rango de deformación de la curva de tracción.

En la figura Nº54b se puede observar que el comportamiento de ambas curvas experiencias, monotónico y cíclico, en el rango plástico, no tienen la misma tendencia.

En la figura Nº54c se puede observar que el comportamiento de ambas curvas experiencias, monotónico y cíclico, en el rango plástico, no tienen la misma tendencia, sin embargo, en la figura Nº54c se puede observar que la curva de ensayo de tracción monotónico coincide con la curva envolvente en el rango elástico.

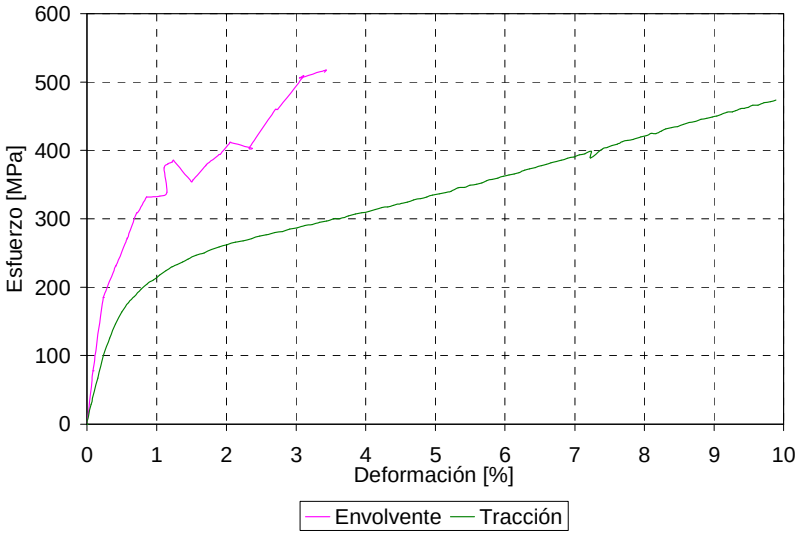


Figura Nº55a
Curva envolvente
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d1, Fino.
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Amplitud de Deformación: 5 [%]
Número de Ciclos: 2

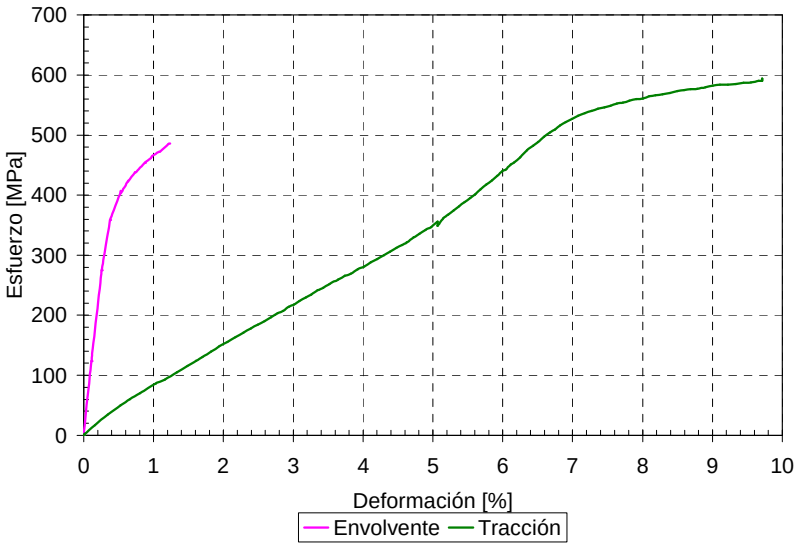


Figura Nº55b
Curva envolvente
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d2, Medio.
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Amplitud de Deformación: 5 [%]
Número de Ciclos: 2

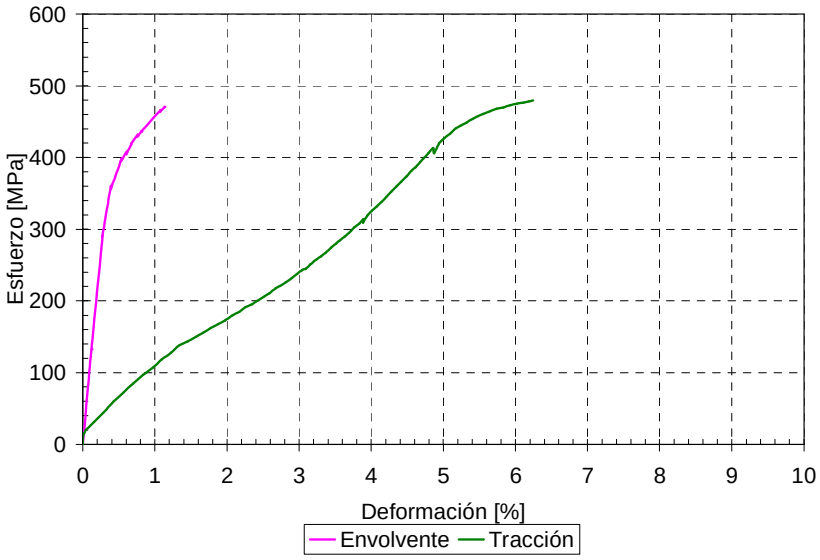


Figura Nº55c
Curva envolvente
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d3, Grueso.
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Amplitud de Deformación: 5 [%]
Número de Ciclos: 2

En la figura Nº55a se puede observar que el ensayo de tracción monotónico y el ensayo cíclico presentan un rango elástico similar. Caso contrario para las Figuras Nº55b y 55c.

En las figuras Nº55a, 55b y 55c se puede observar que el comportamiento de ambas curvas monotónica y cíclica, en el rango plástico, no tienen la misma tendencia.

En la figura Nº55a se puede observar que la curva de ensayo de tracción monotónico no coincide con la curva envolvente en el rango elástico.

En relación con la concordancia entre las curvas envolventes y sus correspondientes curvas de tracción, de las figuras Nº54 (a, b y c) hasta la figura 55 (a, b y c) se observa lo siguiente:

- El acuerdo, similitud entre estas curvas es mejor para d1 que para los tamaños de grano mayores.
- Siempre la curva envolvente está arriba de su correspondiente curva de tracción. Es posible que esto se relaciones con que la primera corresponde a una velocidad de deformación mayor por lo que los esfuerzos de transformación deberían ser mayores.

4.3.4.- Resultado: Variación de la Frecuencia de Oscilación.

En las Figuras Nº56a y 56b se muestran los resultados obtenidos a d1 y d2 respectivamente para T1 y n=10, y a distintas frecuencias 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0. Se consideró una deformación nominal de 5 [%] para lo ensayos.

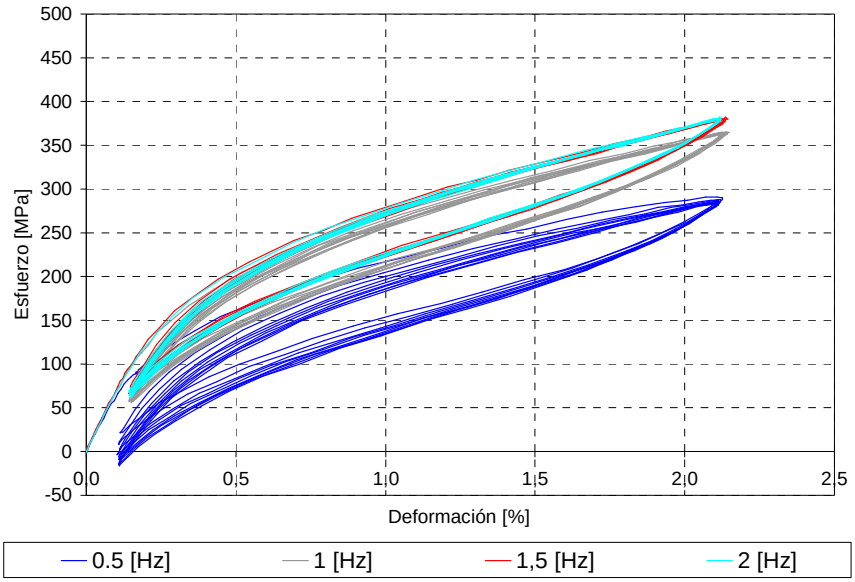


Figura Nº56a
Tipo de Ensayo: Cíclico. Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p. Be. Tamaño de Grano: d1, Fino. Temperatura de ensayo: T1, Media. Amplitud de Deformación: 5 [%]. Número de Ciclos: 10

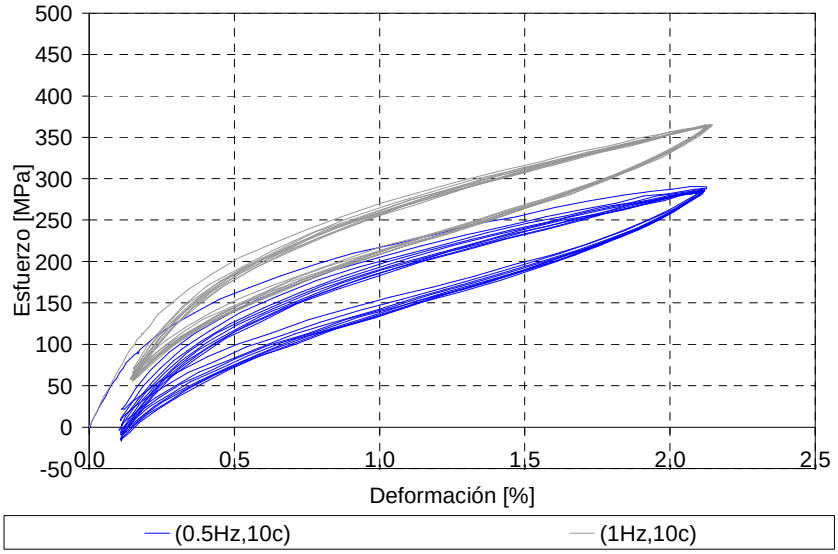


Figura Nº56b
Tipo de Ensayo: Cíclico. Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be. Tamaño de Grano: d2, Medio. Temperatura de ensayo: T1, Media. Amplitud de Deformación: 5 [%]. Número de Ciclos: 10.

En la Figura Nº56a se puede observar un leve aumento de los esfuerzos de transformación, aumento de dureza, con el aumento de la frecuencia de oscilación (de 0,5 a 2 [Hz]) para la Temperatura Ambiente y Tamaño de Grano Fino.

De la Figura Nº56b, existe un leve aumento en los esfuerzos de transformación con el aumento en la frecuencia de oscilación (de 0,5 a 1,0 [Hz]) para la Temperatura Ambiente y Tamaño de Grano Mediano.

En las figuras Nº56a y Nº56b, correspondientes a d1 y d2, se presentan los resultados de experiencias de tracción cíclica para distintas frecuencia (0.5 [Hz], 1.0 [Hz], 1.5 [Hz] y 20 [Hz]) y similar amplitud de deformación. Así, en la Figura Nº56a se observa que, a mayor frecuencia, mayor es el esfuerzo de transformación. Tal esfuerzo corresponde al fin de la zona lineal elástica de la austenita y al comienzo de la transformación de austenita en martensita, inducida por esfuerzo. Este resultado es similar al reportado por Nemat-Naser [13] et al para una aleación Ni-Ti.-Cr superelástica., quienes observaron que el esfuerzo de transformación aumenta al aumentar la velocidad de deformación; ellos explicaron este comportamiento considerando un modelo térmicamente activado.

4.3.5.- Resultado: Variación de la Amplitud de Deformación en 100 y 10 ciclos.

A continuación se presentan los resultados de series con n=100 ciclos, para una misma deformación, la que era similar a la empleada en el acápite anterior (n=10). Estos resultados se presentan en la Figuras Nº57 y 58, correspondientes a d1 y d2, respectivamente. Además, para cada Tamaño de Grano se consideraron dos frecuencias.

4.3.5.1.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Media (T=T1=20 [ºC] aprox.) y Tamaño de Grano Fino (d1)

En la Figura Nº57, se puede observar que los ciclos se van desplazando al aumentar el valor de n (Número de Ciclos) durante una serie, además se presentan algunos resultados de las anteriores series de 10 ciclos. Al coMParar, se observa que la evolución y forma de los 10 ciclos de una serie de 10 ciclos es bastante similar a la de los 10 primeros ciclos de la serie de 100 ciclos pertinente.

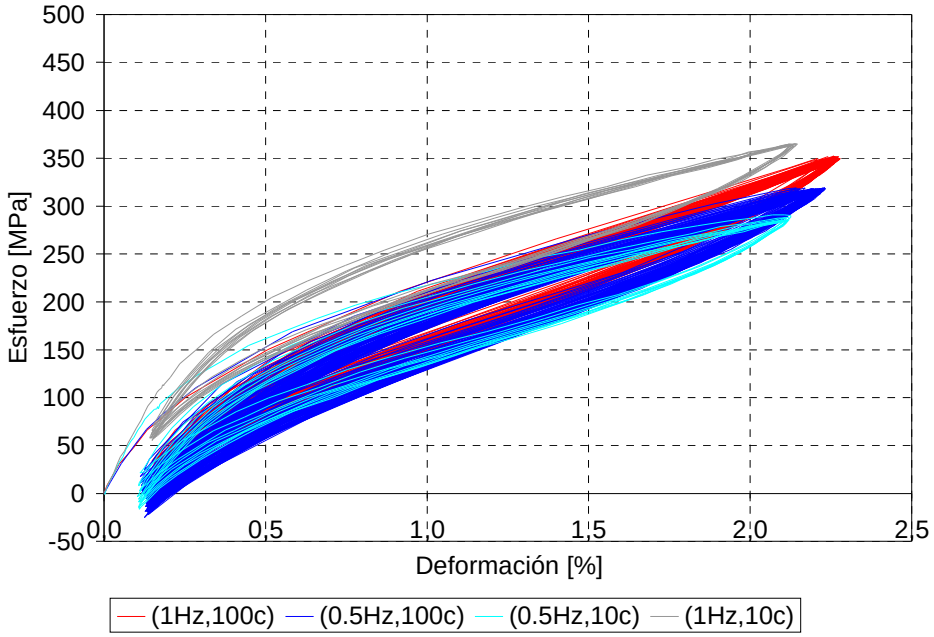


Figura Nº57

Tipo de Ensayo: Cíclico. Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be. Tamaño de Grano: d1, Fino. Temperatura de ensayo: T1, Media. Amplitud de Deformación: 5 [%]. Número de Ciclos: 10 y 100. Frecuencia de Oscilación: 0,5 Hz y 1,0 [Hz]

4.3.5.2.- Ensayos Cíclicos a Temperatura Media (T=T1=20 [ºC] aprox.) y Tamaño de Grano Medio (d2)

valido para los 2

En la Figura Nº58 se observa que con n=100 ciclos, y para frecuencia de 0,5 y 1 Hz, es claro que los ciclos se van desplazando al aumentar el valor de n durante una serie; así es como para una deformación correspondiente al punto medio de la curva de carga, los ciclos están comprendidos en un banda vertical de unos 40 MPa de ancho. También en esta figura se ratifica que a mayor frecuencia, mayor es el esfuerzo de transformación.

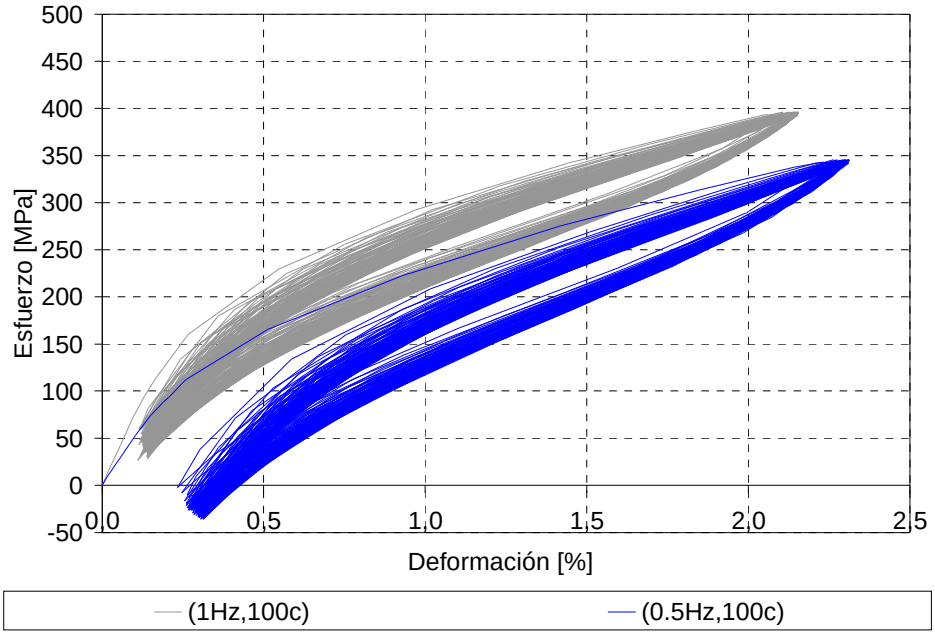


Figura Nº58

Tipo de Ensayo: Cíclico. Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be. Tamaño de Grano: d2, Medio. Temperatura de ensayo: T1, Media. Amplitud de Deformación: 5 [%]. Número de Ciclos: 10 y 100. Frecuencia de Oscilación: 0,5 Hz y 1,0 [Hz]

Al comparar las Figura Nº57 y Nº58, se observa que la evolución y forma de los 10 ciclos de una serie de 10 ciclos es bastante similar a la de los 10 primeros ciclos de la serie de 100 ciclos pertinente. Por otra parte, en la Figura Nº58, correspondiente a d2, también se observa que los ciclos de una serie se desplazan al crecer n, y que, a mayor frecuencia, mayor es el esfuerzo de transformación.

Al comparar los resultados de las Figura Nº57 y Nº58, se observa que, para una misma frecuencia, a mayor tamaño de grano las curvas se desplazan hacia arriba, en esfuerzo.

4.3.6.- Resultado: Comportamiento de los Esfuerzos Máximos

4.3.6.1.- Influencia del número de Ciclos en el comportamiento de los Esfuerzos Máximos.

La Figura Nº59 muestra el comportamiento de los esfuerzos máximos en función del número de Ciclos. La Amplitud de Deformación usada fue de 5 [%]. Se observar directamente que los esfuerzos no varían notablemente con el número de ciclo.

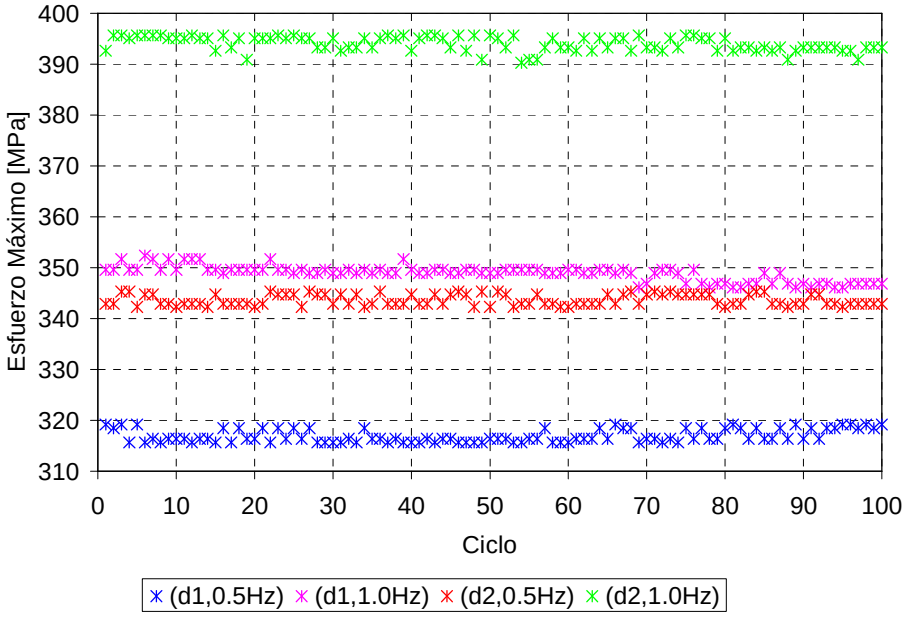


Figura Nº59
Tipo de Ensayo: Cíclico. Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d1 y d2, Temperatura de ensayo: T1, Media.
Amplitud de Deformación: 5 [%]. Número de Ciclos: 100. Frecuencia: 0,5 y 1.0 Hz

Como se puede observar, en términos generales, los esfuerzos máximos registrados para estos ensayos no presentan una variación evidente para hasta los 100 ciclos. A continuación se graficaron los resultados correspondientes para mostrar la influencia de la Frecuencia de Oscilación y Tamaño de Grano sobre los Esfuerzos Máximos:

4.3.6.2.- Influencia del número de Ciclos en el comportamiento de las Deformaciones asociadas

En la Figura Nº59 de puede observar un leve descenso de las deformaciones para n=100. Notar que para los ensayos de 10 ciclos, existe un aumento abrupto en los esfuerzos.

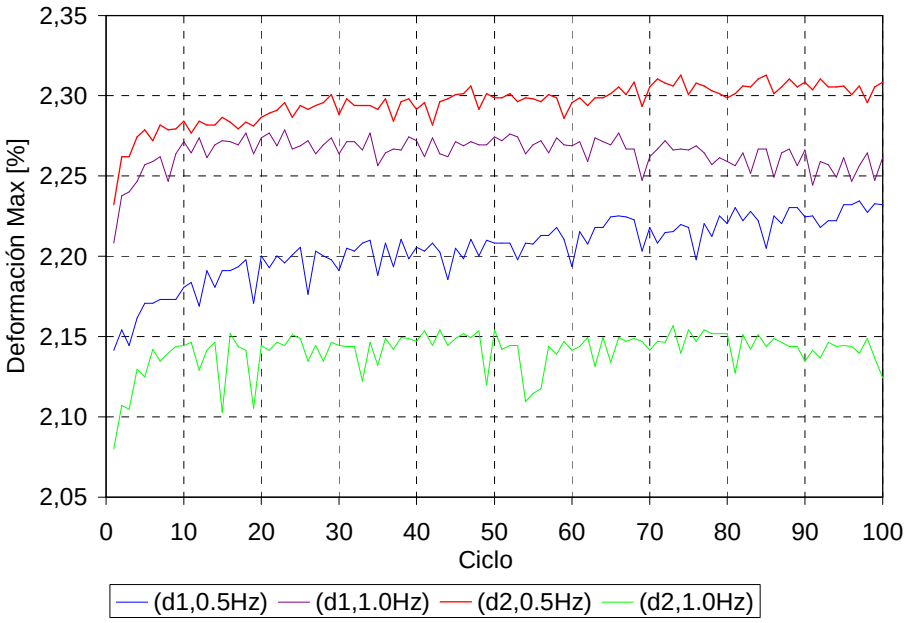


Figura Nº59

Tipo de Ensayo: Cíclico. Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be Tamaño de Grano: d1 y d2, Temperatura de ensayo: T1, Media. Amplitud de Deformación: 5 [%]. Número de Ciclos: 100. Frecuencia: 0,5 y 1.0 Hz

4.3.7.- Energía Disipada en ensayos Cíclicos

4.3.7.1.- Tabla de resultados a Temperatura Ambiente y Alta, Tamaño de Grano Fino, Medio y Grueso.

Tabla Nº9

RESUMEN DISIPACIÓN DE ENERGÍA TEMPERATURA MEDIA Y TAMAÑO DE GRANO FINO									
Deformación	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía Disipada	Módulos
	β1	β2	β3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular		Secante
[%]	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]
0,5	0,728	0,395	0,364	0,230	9,388	10,011	20,022	1,143	501,023
1	4,280	0,852	2,140	3,032	45,665	44,611	89,222	6,723	433,353
1,5	3,685	1,488	1,843	14,457	154,597	124,839	249,679	5,789	313,176
2	5,872	2,483	2,936	35,262	205,029	175,150	350,300	9,223	161,320
2,3	5,278	1,929	2,639	42,170	348,036	254,405	508,810	8,290	195,054
2,6	5,764	2,027	2,882	57,256	449,515	316,249	632,498	9,054	170,052
3	7,095	2,519	3,547	88,412	556,611	392,790	785,579	11,144	153,417
3,3	7,719	2,137	3,859	81,769	542,422	388,987	777,974	12,124	247,578
3,6	7,422	2,633	3,733	118,600	711,211	504,567	1009,144	11,667	131,112
4	6,563	2,300	3,288	119,588	822,975	578,688	1157,413	10,325	124,737

Tabla Nº10

RESUMEN DISIPACIÓN DE ENERGÍA TEMPERATURA MEDIA Y TAMAÑO DE GRANO MEDIO									
Deformación	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía Disipada	Módulos
	β1	β2	β3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular		Secante
[%]	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]
0,5	5,515	0,046	2,757	0,031	19,804	7,336	14,672	8,663	638,183
1	3,328	1,076	1,664	7,331	107,956	63,659	127,318	5,228	491,807
1,5	4,440	1,302	2,220	19,069	233,142	136,778	273,556	6,974	334,238
2	4,861	1,516	2,431	35,529	372,889	232,695	465,391	7,636	265,609
2,3	4,869	1,607	2,434	45,892	454,423	300,106	600,213	7,648	241,631
2,6	6,816	1,522	3,408	50,939	473,830	323,266	646,532	10,707	228,206
3	5,403	1,833	2,702	74,418	646,224	438,405	876,809	8,487	194,421
3,3	5,586	1,894	2,793	86,078	723,514	490,526	981,052	8,774	179,900
3,6	5,863	1,975	2,938	100,763	806,188	547,638	1095,238	9,213	167,496
4	6,275	2,125	3,138	123,488	921,600	625,275	1250,513	9,875	153,201

Tabla Nº11

RESUMEN DISIPACIÓN DE ENERGÍA TEMPERATURA MEDIA Y TAMAÑO DE GRANO GRUESO									
Deformación	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía Disipada	Módulos
	β1	β2	β3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular		Secante
[%]	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]
0,5	6,788	0,131	3,394	0,192	20,650	3,323	6,647	10,662	624,302
1	3,228	0,443	1,614	2,146	77,090	21,175	42,349	5,071	521,750
1,5	3,741	0,656	1,870	5,817	141,192	49,524	99,048	5,876	441,765
2	3,948	0,797	1,974	10,824	215,988	87,313	174,627	6,202	387,551
2,3	5,243	0,860	2,621	16,946	314,397	103,588	207,175	8,236	287,048
2,6	4,662	0,826	2,331	18,960	365,269	129,458	258,916	7,323	277,614
3	4,725	0,887	2,362	24,415	438,006	164,510	329,021	7,421	260,897
3,3	4,787	0,934	2,394	28,923	492,939	192,316	384,632	7,520	250,547
3,6	4,720	0,979	2,360	33,426	543,450	225,430	450,860	7,415	244,960
4	4,975	1,058	2,487	41,586	625,739	266,112	532,223	7,815	230,878
4,5	5,208	1,172	2,604	53,020	720,135	324,122	648,244	8,180	221,006
5	5,388	1,282	2,694	65,908	818,161	389,478	778,955	8,463	213,270
5,5	6,468	1,446	3,234	86,711	954,625	426,863	853,726	10,160	185,787
6	6,313	1,500	3,175	97,938	1021,988	493,563	987,113	9,925	187,079
7	8,167	1,600	4,100	123,089	1079,400	575,278	1150,589	12,844	197,714
8	6,238	2,138	3,113	154,300	1150,913	786,150	1572,288	9,775	205,237
9	5,938	2,150	2,963	171,350	1267,138	919,888	1839,750	9,300	209,088

Tabla Nº12

RESUMEN DISIPACIÓN DE ENERGÍA TEMPERATURA ALTA Y TAMAÑO DE GRANO FINO									
Deformación	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía Disipada	Módulos
	β1	β2	β3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular		Secante
[%]	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]
0,5	0,548	0,100	0,274	0,086	14,405	3,893	7,786	0,862	886,822
1	2,588	0,192	1,294	0,543	40,178	18,746	37,493	4,065	759,983
1,5	4,562	0,522	2,281	3,394	92,171	43,749	87,497	7,165	557,476
2	2,866	0,785	1,433	8,458	173,666	94,319	188,639	4,502	476,376
2,3	3,390	0,694	1,695	8,347	161,481	91,886	183,772	5,325	368,949
2,6	2,956	0,802	1,478	12,478	220,838	125,769	251,538	4,643	394,510
3	4,749	0,915	2,374	21,191	306,974	157,424	314,849	7,459	269,364
3,3	3,684	1,061	1,842	24,286	364,358	209,911	419,822	5,787	335,357
3,6	3,659	1,116	1,830	28,129	401,311	244,810	489,619	5,748	326,532
4	5,281	1,341	2,641	43,612	517,647	262,933	525,867	8,295	249,568
4,5	5,423	1,456	2,711	53,493	584,809	314,153	628,307	8,518	234,728
5	5,661	1,568	2,830	63,598	645,539	357,614	715,227	8,892	220,822
5,5	5,972	1,691	2,986	74,138	697,765	395,145	790,291	9,380	206,456
6	6,872	1,909	3,436	96,981	808,363	449,260	898,520	10,795	186,920
7	7,000	2,213	3,488	128,650	919,438	585,775	1171,538	10,975	184,023
8	7,113	2,538	3,575	162,138	1016,613	724,313	1448,638	11,213	182,395
9	8,689	3,100	4,356	240,178	1233,233	885,311	1770,644	13,633	162,121

Tabla Nº13

RESUMEN DISIPACIÓN DE ENERGÍA TEMPERATURA ALTA Y TAMAÑO DE GRANO MEDIO									
Deformación	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía Disipada	Módulos
	β1	β2	β3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular		Secante
[%]	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]
0,5	3,965	0,208	1,983	0,045	5,366	3,291	6,581	6,229	1041,850
1	3,656	0,064	1,828	0,117	31,670	27,496	54,992	5,743	1034,789
1,5	0,458	0,203	0,229	0,944	73,781	65,566	131,132	0,719	921,999
2	1,463	0,575	0,732	4,818	133,252	104,779	209,558	2,298	740,408
2,3	1,927	0,719	0,963	7,926	175,529	130,944	261,887	3,027	648,208
2,6	3,148	0,716	1,574	9,715	192,137	139,588	279,177	4,945	547,571
3	2,562	0,904	1,281	15,477	272,306	192,269	384,538	4,024	510,848
3,3	3,966	1,390	1,983	27,564	315,558	220,718	441,436	6,230	470,701
3,6	4,299	1,484	2,150	33,995	364,448	251,043	502,085	6,753	433,405
4	4,677	1,597	2,339	42,783	426,498	290,494	580,987	7,347	393,728

Tabla Nº14

RESUMEN DISIPACIÓN DE ENERGÍA TEMPERATURA ALTA Y TAMAÑO DE GRANO GRUESO									
Deformación	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía Disipada	Módulos
	β1	β2	β3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular		Secante
[%]	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]
0,5	0,198	0,044	0,099	0,033	12,012	5,301	10,602	0,311	1109,650
1	1,035	0,021	0,517	0,065	42,801	28,357	56,714	1,625	980,518
1,5	0,762	0,294	0,381	1,765	95,664	73,680	147,360	1,197	930,310
2	1,491	0,574	0,745	5,433	150,471	115,935	231,871	2,341	774,653
2,3	1,763	0,660	0,882	7,467	179,988	134,746	269,492	2,770	711,445
2,6	1,963	0,724	0,981	9,303	204,373	150,751	301,502	3,083	665,544
3	2,204	0,789	1,102	12,141	244,654	175,250	350,500	3,462	606,496
3,3	2,313	0,817	1,156	14,041	273,520	193,232	386,463	3,633	570,248
3,6	2,977	1,009	1,489	24,350	383,844	260,195	520,389	4,677	466,268
4	5,460	1,308	2,730	35,228	384,614	260,353	520,706	8,577	439,177

Discusión

- Las Tablas de Resultados de Energía en los Ensayos Cíclicos (Tablas Nº12, 13, 14, 15, 16 y 17) para los distintos Tamaños de Grano (Fino, Medio y Grueso) y Temperaturas de Ensayo (Media y Alta) fueron obtenidos del Software MATLAB. Los parámetros de entrada fueron los esfuerzos y deformaciones de los ciclos (10 ciclos) y el programa, por medio de un algoritmo dado (ver Anexo) calcula los 3 factores de amortiguamiento, las áreas bajo la curva, la energía disipada y los módulos elásticos y secantes.

- Los valores que aparecen en las Tablas anteriormente señaladas son el promedio de 10 valores (correspondiente a los 10 ciclos en cuestión) por cada deformación nominal. Por ejemplo, la deformación nominal 2,6 [%], Temperatura de Ensayo Media (Ambiental) y Tamaño de Grano Fino (64,5 [μm]) los valores obtenidos fueron:

Tabla Nº15

RESUMEN DISIPACIÓN DE ENERGÍA TEMPERATURA ALTA Y TAMAÑO DE GRANO GRUESO AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2.6 [%]									
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía Disipada	Módulos
	β1	β2	β3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular		Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]
1	6,1152	2,0152	3,0576	59,4255	469,3285	309,3218	618,6435	9,6058	164,0371
2	5,9488	2,1219	2,9744	60,0531	450,4397	321,3309	642,6617	9,3444	167,4609
3	5,864	2,0859	2,932	58,141	443,6259	315,5987	631,1975	9,2112	171,4018
4	5,5172	1,9886	2,7586	54,9887	440,0929	317,251	634,502	8,6664	174,109
5	5,591	1,9989	2,7955	55,8405	444,6123	317,9157	635,8315	8,7823	173,7449
6	5,6222	1,9786	2,8111	56,1205	451,4125	317,7367	635,4734	8,8313	170,2484
7	5,8468	2,0258	2,9234	57,5108	451,8341	313,0993	626,1985	9,1841	169,1616
8	5,6072	2,0028	2,8036	55,9709	444,7775	317,7367	635,4734	8,8077	170,2484
Promedio	**5,764**	**2,027**	**2,882**	**57,256**	**449,515**	**316,249**	**632,498**	**9,054**	**170,052**

El Programa usado elimina los 2 primeros ciclos y procesa solo los 8 restantes. Los valores promedio corresponde a la deformación nominal 2,6 [%] de la Tabla Nº12.

4.3.7.2.- Gráficos Módulo Secante

4.3.7.2.1.- Módulo Secante en función de la Deformación para los distintos Tamaños de Grano.

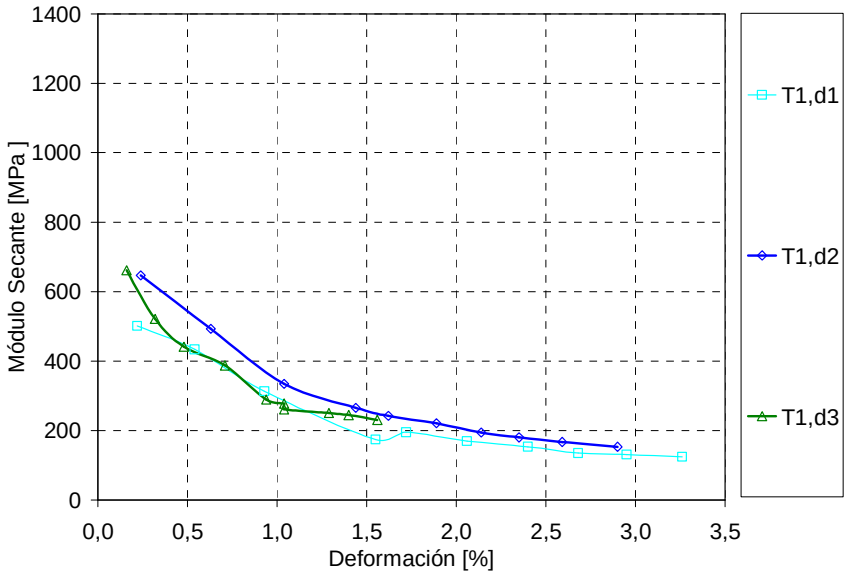


Figura Nº60a

Módulo Secante. Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be. Temperatura de ensayo: T1, Media. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]. Número de Ciclos: 10.

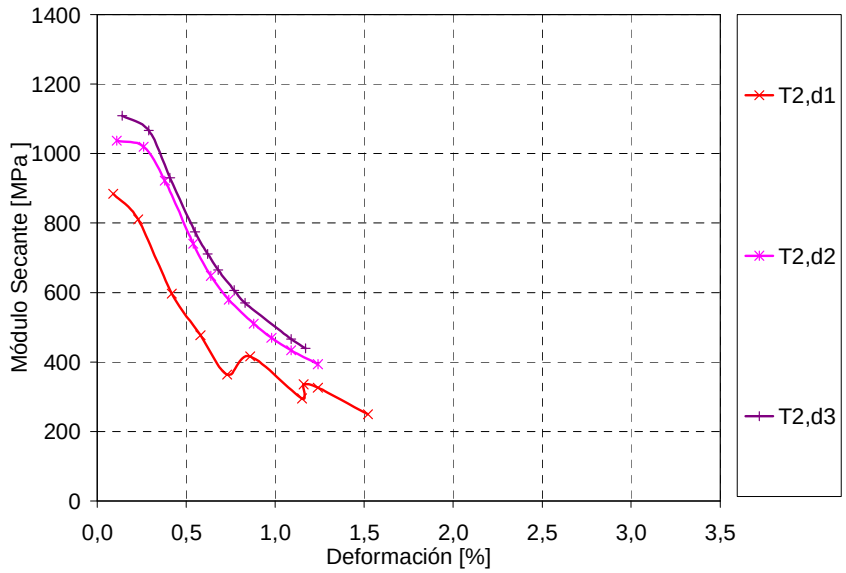


Figura Nº60b

Módulo Secante. Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be. Temperatura de ensayo: T2, Alta. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]. Número de Ciclos: 10.

El Módulo Secante tiene un comportamiento decreciente con el porcentaje de deformación para los 3 Tamaños de Grano: Fino, Medio y Grueso. Válido para la Temperatura de Ensayo Media y Alta.

Para la figura Nº 60b se observa que para una misma amplitud de deformación, los valores mas altos para el módulo secante se obtienen con un Tamaño e Grano Grueso.

4.3.7.2.2.- Módulo Secante en función de la Deformación para las temperaturas de Ensayo

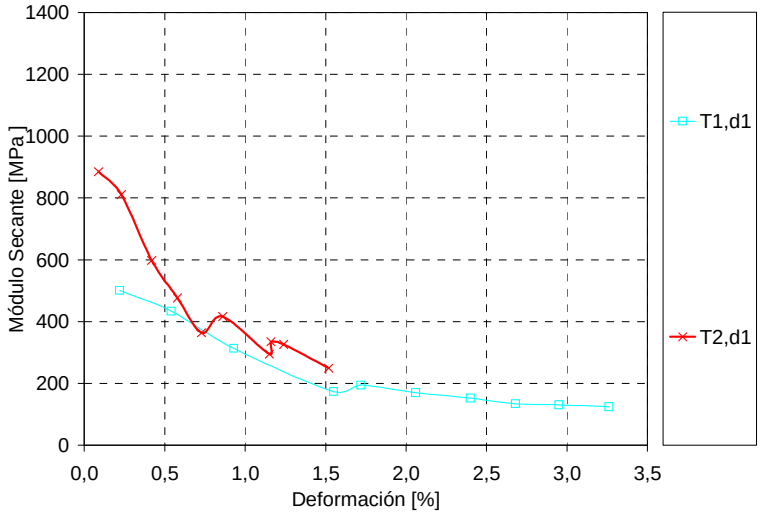


Figura Nº61a
Módulo Secante. Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be. Tamaño de Grano: Fino, d1. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]. Número de Ciclos: 10.

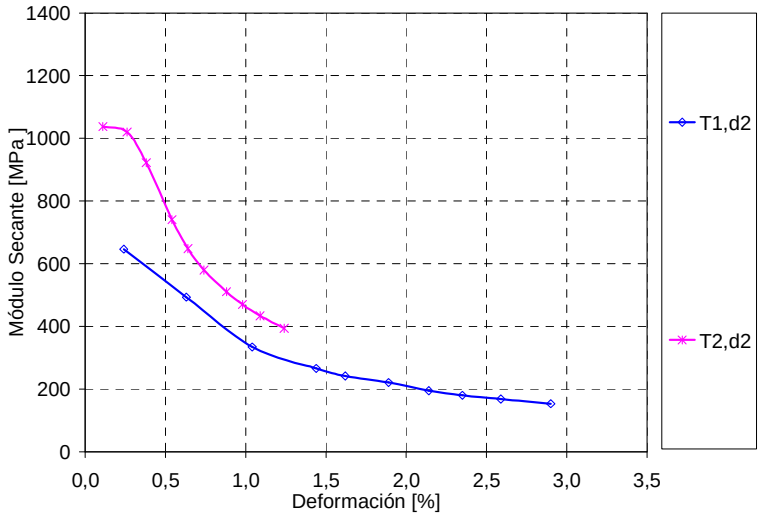


Figura Nº61b
Módulo Secante. Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be. Tamaño de Grano: Medio, d2. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]. Número de Ciclos: 10.

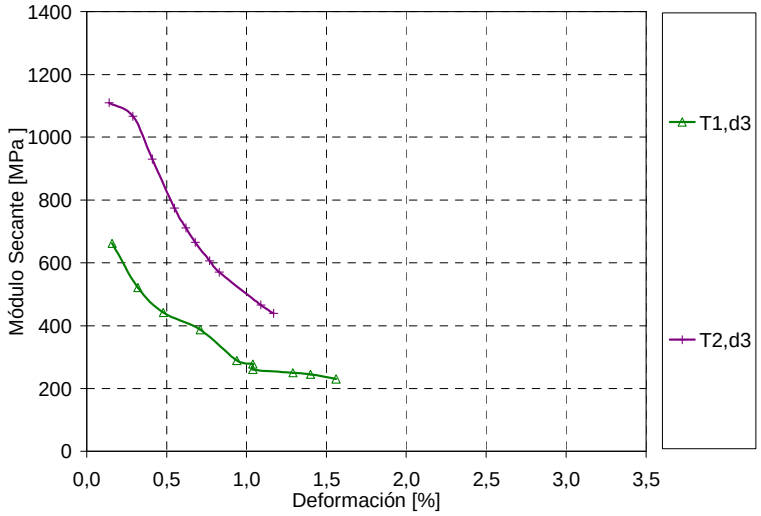


Figura Nº61c
Módulo Secante. Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be. Tamaño de Grano: Gueso, d3, Alta. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]. Número de Ciclos: 10.

De las Figuras Nº61a, 61b y 61c se puede observar que a Mayor Temperatura de Ensayo mayor es el Módulo Secante

4.3.7.3.- Gráficos Coeficiente de Amortiguamiento

4.3.7.3.1.- Temperatura Media (T=T1=20 [ºC] aprox.)

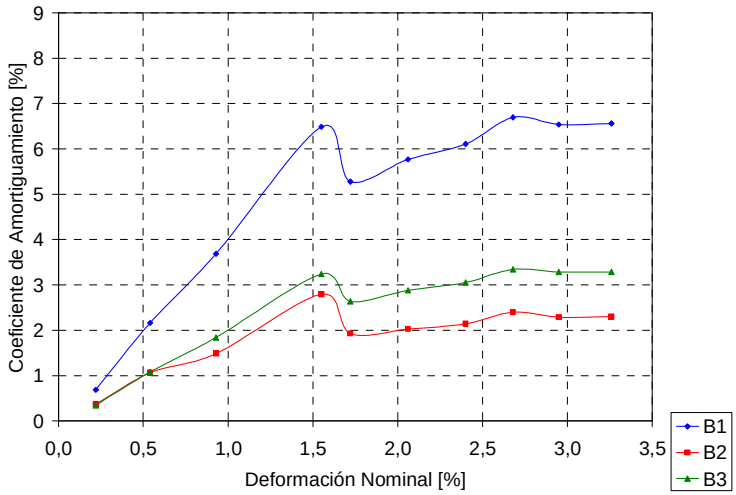


Figura Nº62a
Coeficientes de Amortiguamiento
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d1, Fino.
Temperatura de ensayo: T1, Media.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

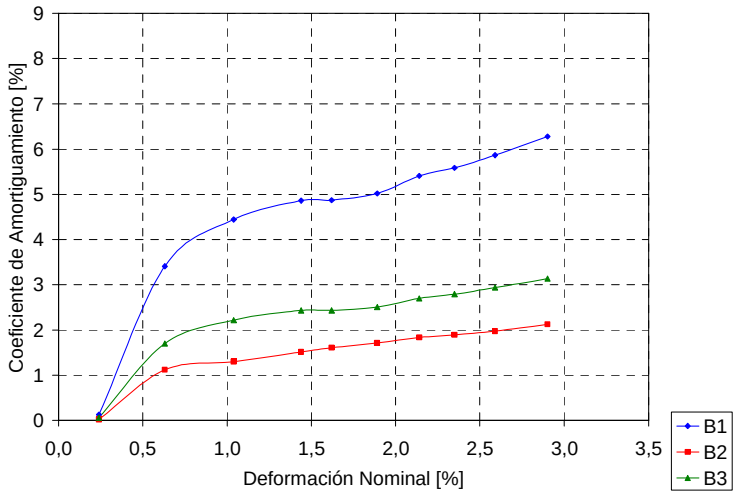


Figura Nº62b
Coeficientes de Amortiguamiento
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d2, Mdio.
Temperatura de ensayo: T1, Media.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

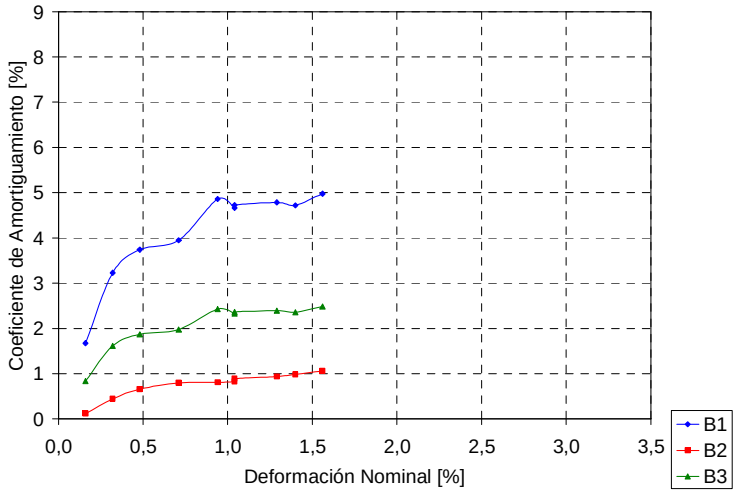


Figura Nº62c
Coeficientes de Amortiguamiento
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d3, Grueso.
Temperatura de ensayo: T1, Media.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

La tendencia de los coeficientes de amortiguamiento para la aleación de Tamaño de Grano Fino es creciente (figura Nº62a). Para el Tamaño de Grano Medio y Grueso, la tendencia también es creciente (figuras Nº62b y 62c).

4.3.7.3.2.- Temperatura Alta (T=T2=50 [ºC] aprox.)

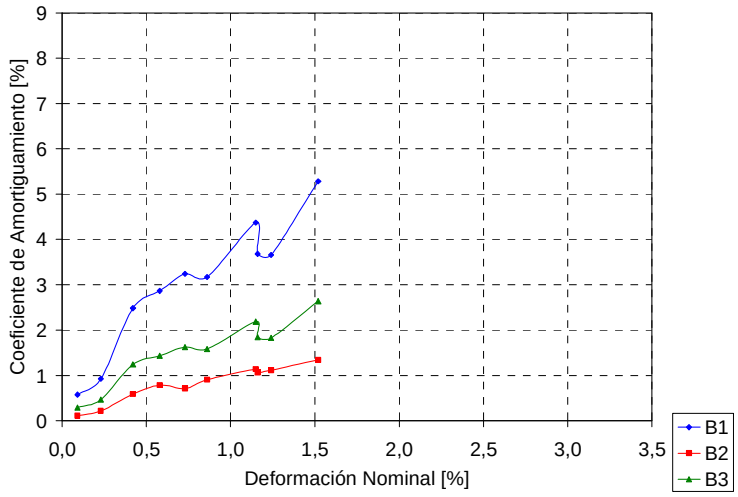


Figura Nº63a
Coeficientes de Amortiguamiento
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d1, Grueso.
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

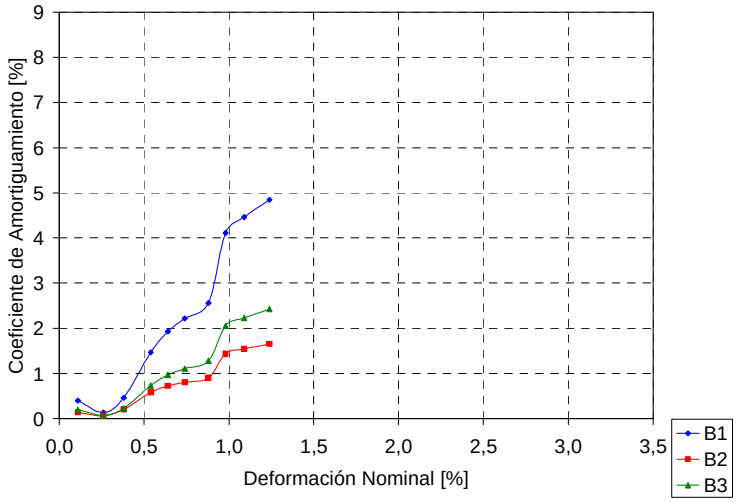


Figura Nº63b
Coeficientes de Amortiguamiento
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d2, Grueso.
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

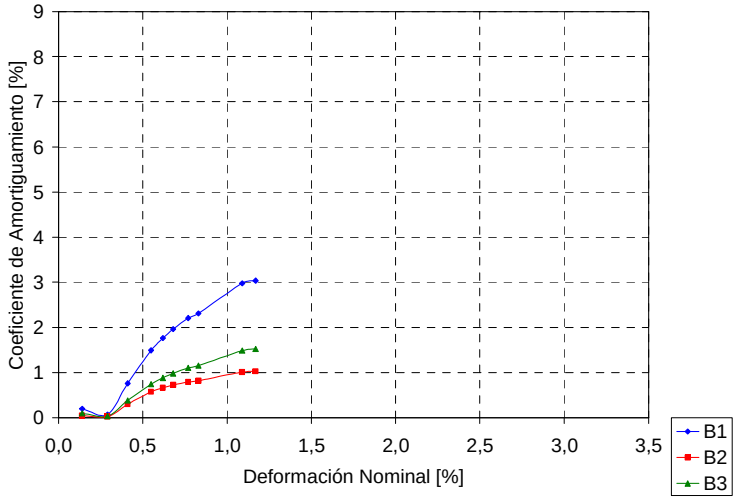


Figura Nº63c
Coeficientes de Amortiguamiento
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d3, Grueso.
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

De las Figuras Nº 63a, 63b y 63c se observa que el coeficiente de amortiguamiento β2 tiene un comportamiento creciente con el porcentaje de deformación. Esto válido para la Temperatura de Ensayo Alta y Tamaño de Grano Fino, Medio y Grueso.

4.3.7.4.- Gráficos Energía Disipada

4.3.7.4.1.- Temperatura Media (T=T1=20 [ºC] aprox.)

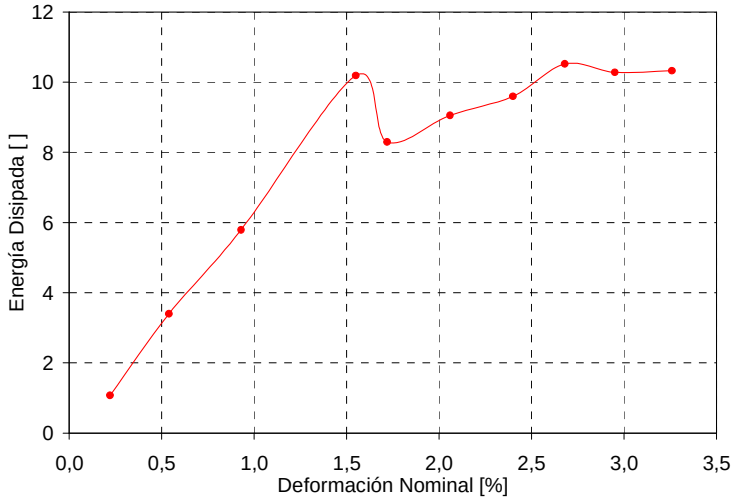


Figura Nº64a
Energía Disipada
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d1, Fino.
Temperatura de ensayo: T1, Medio.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

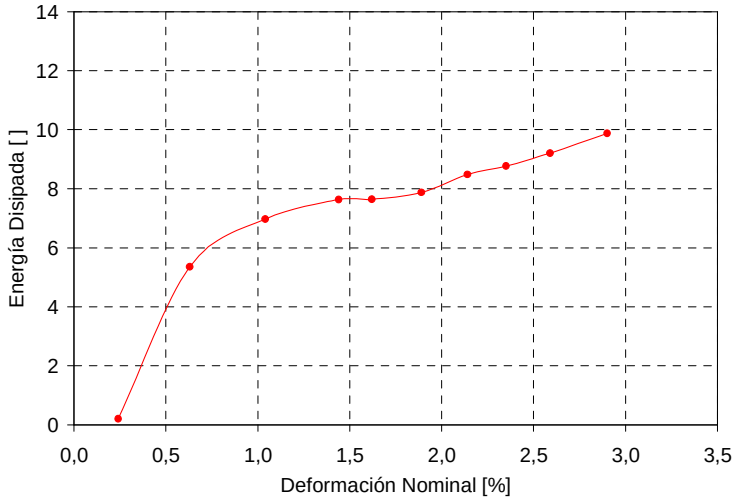


Figura Nº64b
Energía Disipada
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d2, Medio.
Temperatura de ensayo: T1, Medio.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

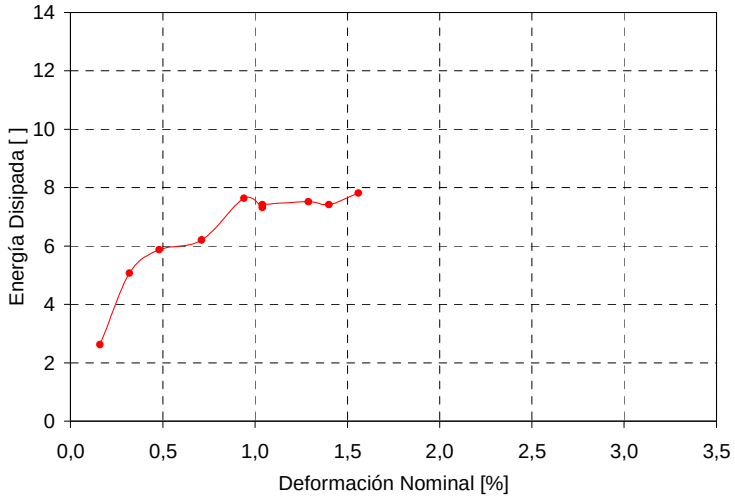


Figura Nº64c
Energía Disipada
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d3, Grueso.
Temperatura de ensayo: T1, Medio.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

De las Figuras Nº64a y 6b, la Energía disipada tiene un comportamiento creciente con el porcentaje de deformación para los 3 Tamaños de Grano: Fino, Medio y Grueso. Válido para la Temperatura de Ensayo Media.

La mayor energía disipada se presentó en la probeta de Tamaño de Grano Grueso.

4.3.7.4.2.- Temperatura Alta (T=T2=50 [ºC] aprox.)

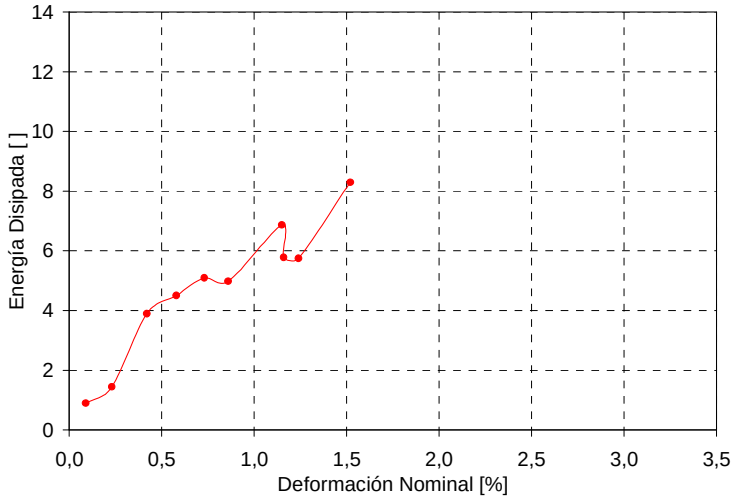


Figura Nº65a
Energía Disipada
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d1, Fino.
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

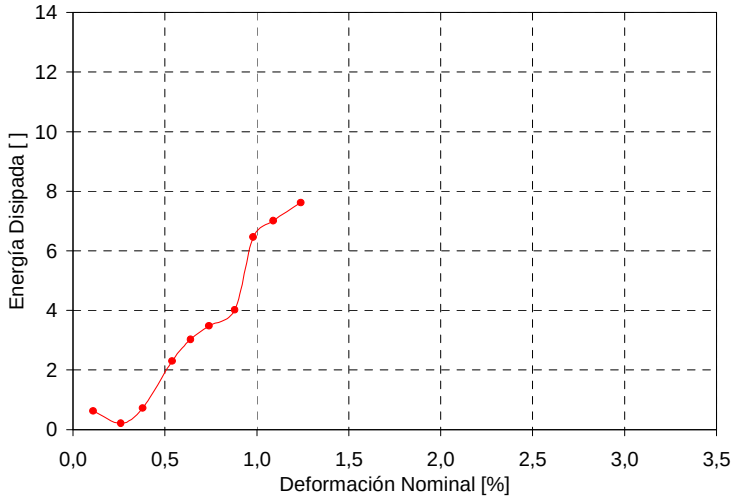


Figura Nº65b
Energía Disipada
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d2, Medio.
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

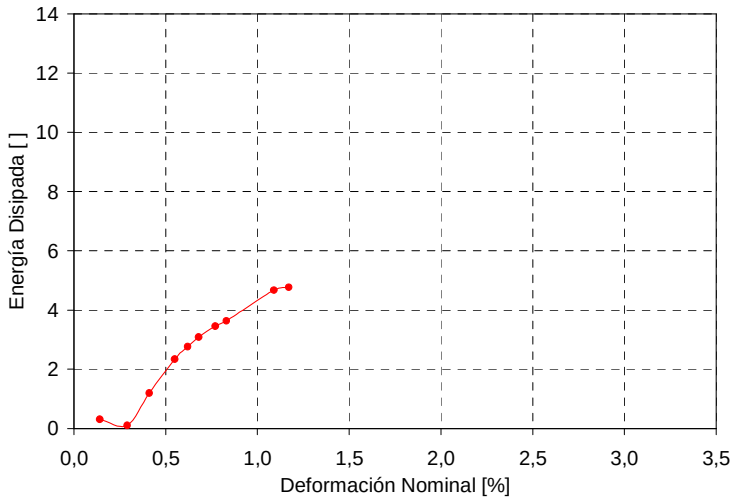


Figura Nº65c
Energía Disipada
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d3, Grueso.
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

La Energía disipada tiene un comportamiento creciente con el porcentaje de deformación para los 3 Tamaños de Grano: Fino, Medio y Grueso. Válido para la Temperatura de Ensayo Alta.

La mayor energía disipada se presentó en la probeta de Tamaño de Grano Fino, al igual que en el caso anterior (Temperatura de Ensayo Media).

4.3.7.5.- Influencia del Tamaño de Grano en el Factor de Amortiguamiento β1

A continuación se grafica la influencia del Tamaño de Grano (d1, d2 y d3) en el Factor de Amortiguamiento β1 para la Temperatura de Ensayo Media (Figura Nº66a) y Alta (Figura Nº66b)

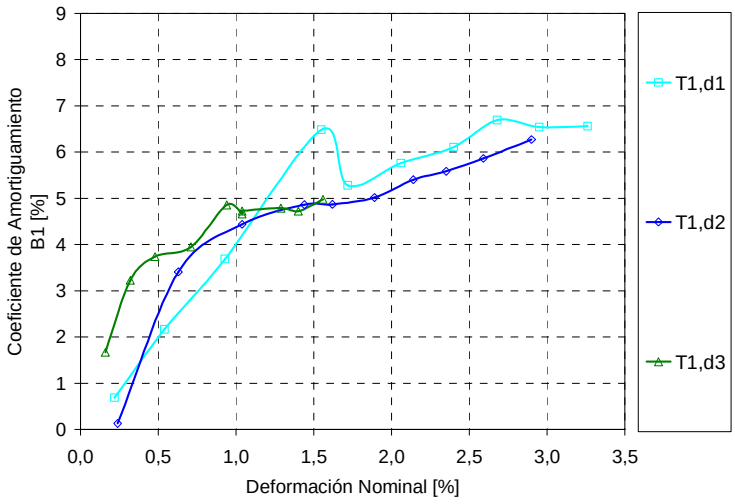


Figura Nº66a
Factor de Amortiguamiento β1
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Temperatura de ensayo: T1, Media.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

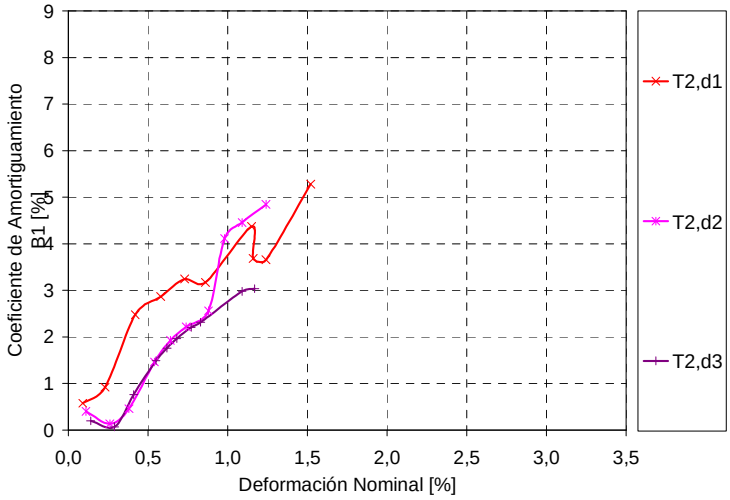


Figura Nº66b
Factor de Amortiguamiento β1
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

Se puede observar que la aleación de menor Tamaño de Grano (d1) presenta mayores coeficientes de Amortiguamiento β1. Válido para las Temperaturas de Ensayo Media y Alta (Figuras Nº66a y 66b respectivamente)

4.3.7.6.- Influencia del Tamaño de Grano en el Factor de Amortiguamiento β2

A continuación se grafica la influencia del Tamaño de Grano (d1, d2 y d3) en el Factor de Amortiguamiento β2 para la Temperatura de Ensayo Media (Figura Nº67a) y Alta (Figura Nº67b)

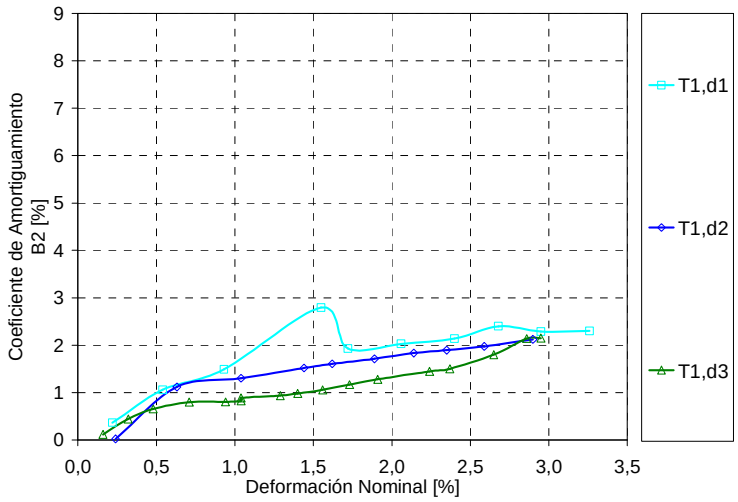


Figura Nº67a
Factor de Amortiguamiento β2
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Temperatura de ensayo: T1, Media.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

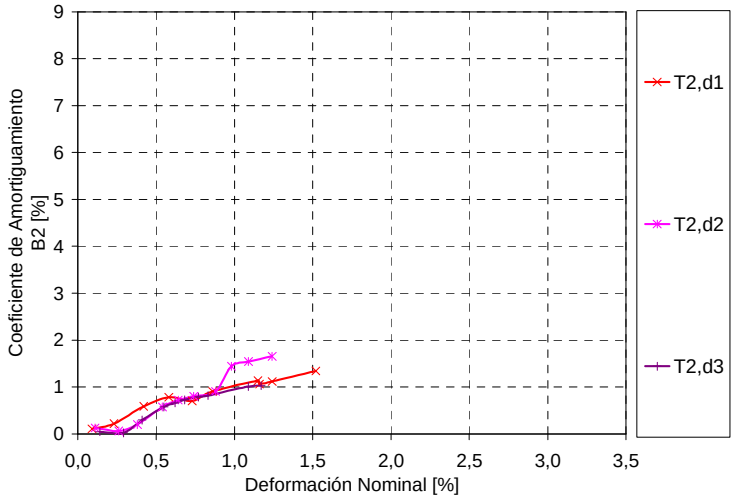


Figura Nº67b
Factor de Amortiguamiento β2
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

Se puede observar que la aleación de menor Tamaño de Grano (d1) presenta mayores coeficientes de Amortiguamiento β2. Válido para las Temperaturas de Ensayo Media y Alta.

4.3.7.7.- Influencia del Tamaño de Grano en el Factor de Amortiguamiento β3

A continuación se grafica la influencia del Tamaño de Grano (d1, d2 y d3) en el Factor de Amortiguamiento β3 para la Temperatura de Ensayo Media (Figura Nº68a) y Alta (Figura Nº68b)

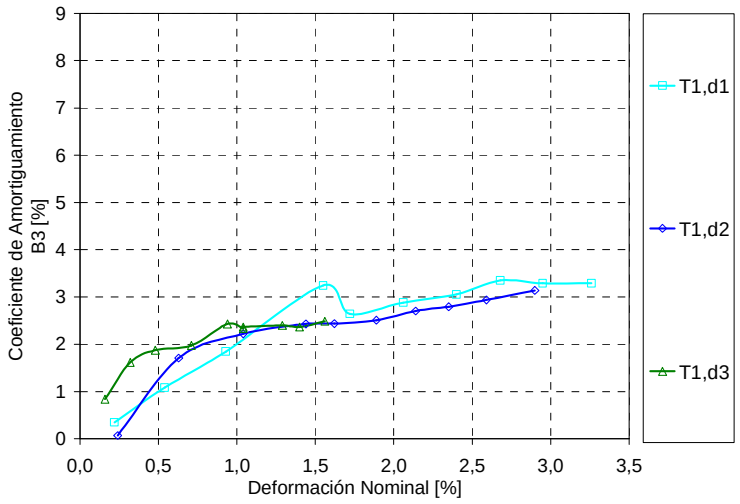


Figura Nº68a
Factor de Amortiguamiento β3
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Temperatura de ensayo: T1, Media.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

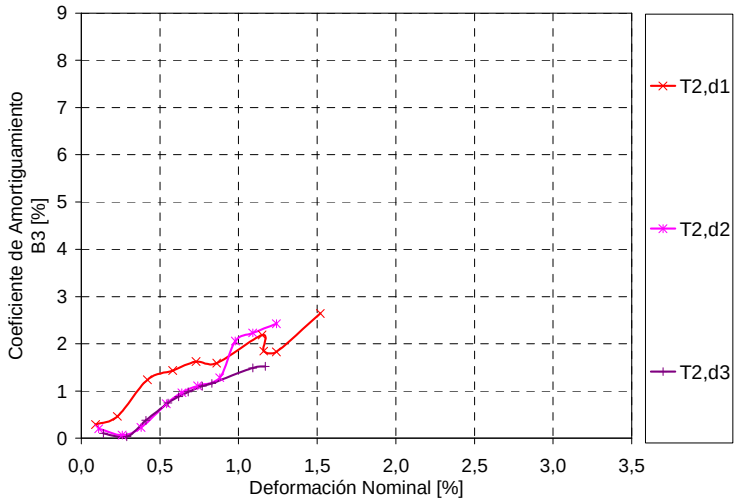


Figura Nº68b
Factor de Amortiguamiento β3
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

Se puede observar que la aleación de menor Tamaño de Grano (d1) presenta mayores coeficientes de Amortiguamiento β3. Válido para las Temperaturas de Ensayo Media y Alta (Figuras Nº68a y 68b respectivamente)

4.3.7.8.- Influencia de la Temperatura de Ensayo en el Factor de Amortiguamiento β1

A continuación se grafica la influencia de la Temperatura de Ensayo en el Factor de Amortiguamiento β1 para el Tamaño de Grano Fino (Figura Nº69a), Medio (Figura Nº128) y Grueso (Figura Nº69b)

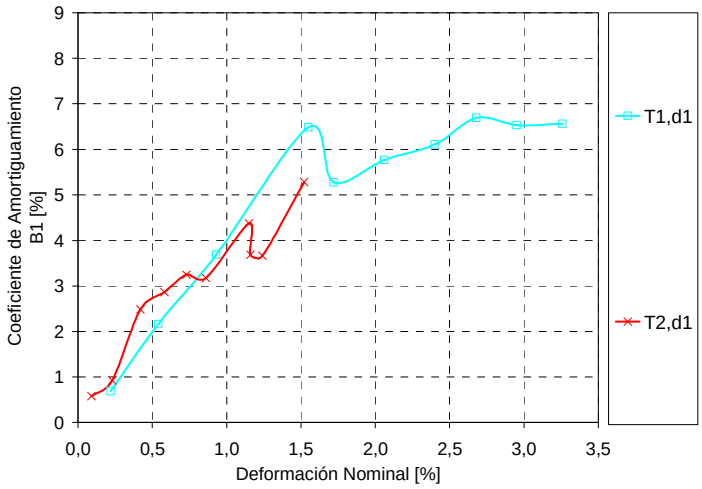


Figura Nº69a
Factor de Amortiguamiento β1
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d1, Fino.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

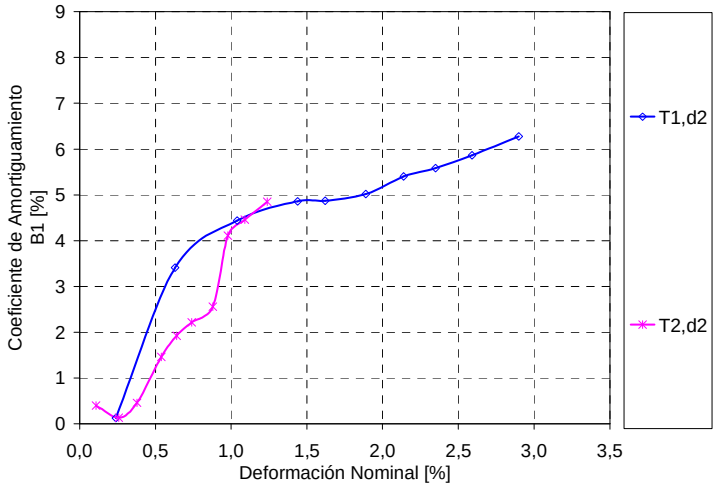


Figura Nº69b
Factor de Amortiguamiento β1
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d2, Medio.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

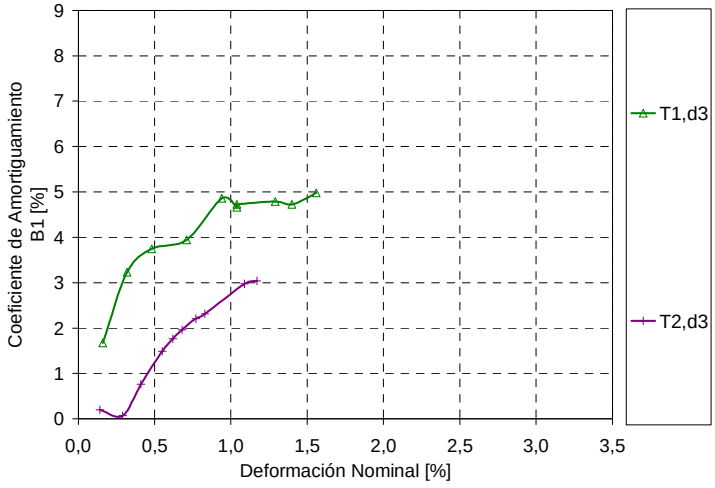


Figura Nº69c
Factor de Amortiguamiento β1
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d3, Grueso.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

Se puede observar que a una misma amplitud de deformación nominal impuesta, la aleación de menor Temperatura de Ensayo (T1) presenta mayores valores de coeficiente de Amortiguamiento β1. Esta tendencia se repite para los Tamaños de Grano Fino (Figuras Nº69a), Medio (Figuras Nº69b) y Alto (Figuras Nº69c).

4.3.7.9.- Influencia de la Temperatura de Ensayo en el Factor de Amortiguamiento β2

A continuación se grafica la influencia de la Temperatura de Ensayo en el Factor de Amortiguamiento β2 para el Tamaño de Grano Fino (Figura Nº70a), Medio (Figura Nº70b) y Grueso (Figura Nº70c)

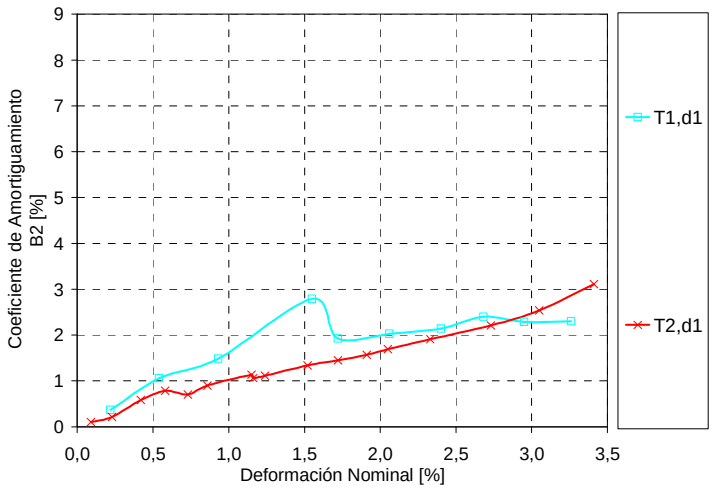


Figura Nº70a
Factor de Amortiguamiento β2
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d1, Fino.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

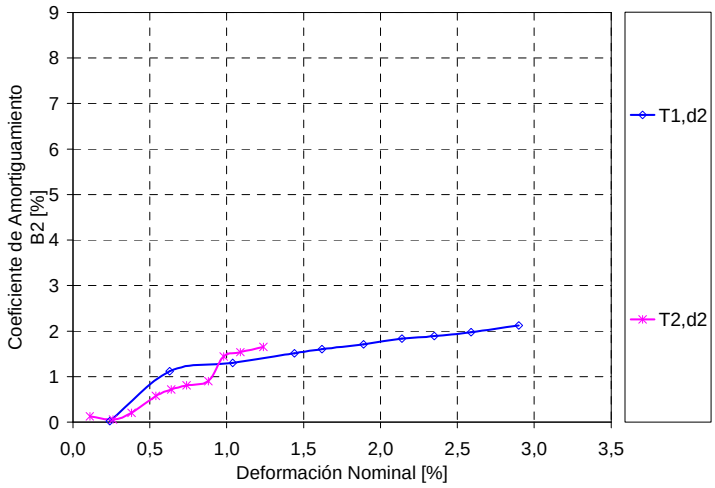


Figura Nº70b
Factor de Amortiguamiento β2
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d2, Medio.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

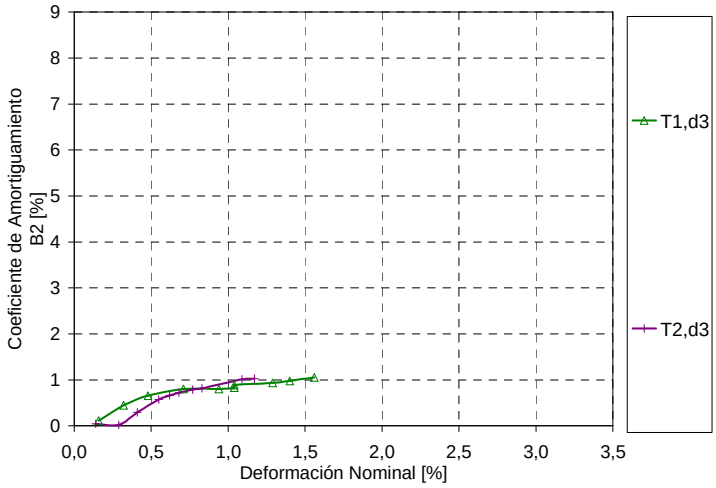


Figura Nº70c
Factor de Amortiguamiento β2
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d3, Grueso.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

Se puede observar que a una misma Amplitud de Deformación nominal impuesta, la aleación de menor Temperatura de Ensayo (T1) presenta mayores valores de coeficiente de Amortiguamiento β2. Esta tendencia se repite para los Tamaños de Grano Fino (Figuras Nº70a) y Medio (Figuras Nº70b). Para la Temperatura de Ensayo Alta (Figuras Nº70c) esta tendencia no se puede validar.

4.3.7.10.- Influencia de la Temperatura de Ensayo en el Factor de Amortiguamiento β3

A continuación se grafica la influencia de la Temperatura de Ensayo en el Factor de Amortiguamiento β3 para el Tamaño de Grano Fino (Figura Nº71a), Medio (Figura Nº71b) y Grueso (Figura Nº71c)

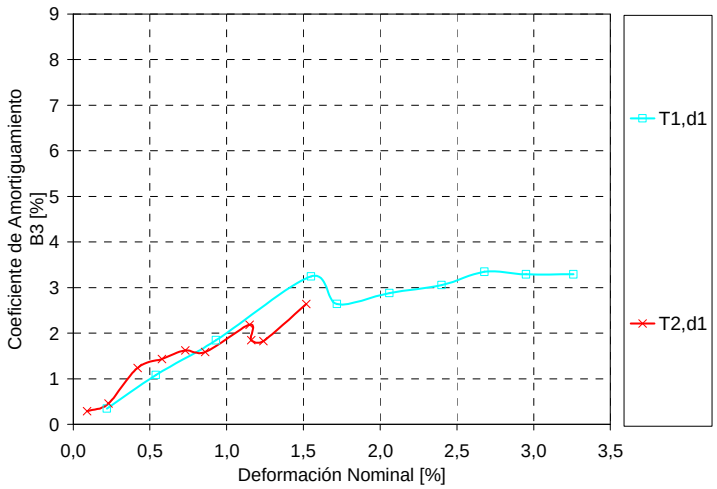


Figura Nº71a
Factor de Amortiguamiento β3
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d1, Fino.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

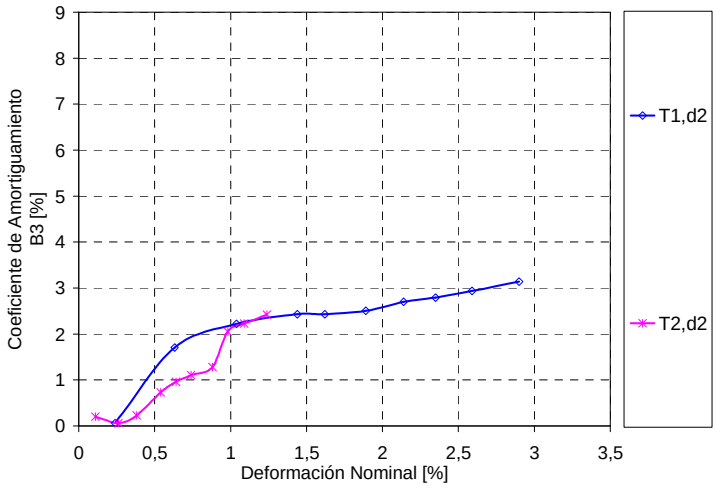


Figura Nº71b
Factor de Amortiguamiento β3
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d2, Medio.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

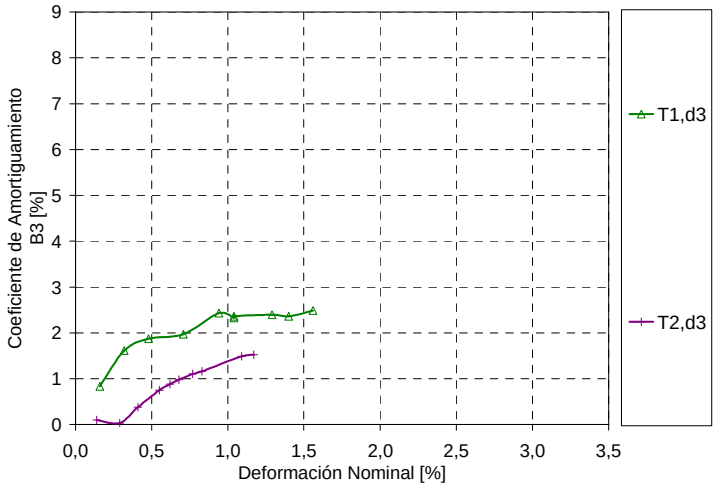


Figura Nº71c
Factor de Amortiguamiento β3
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d3, Grueso.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

Se puede observar que a una misma amplitud de deformación nominal impuesta, la aleación de menor Temperatura de Ensayo (T1) presenta mayores valores de coeficiente de Amortiguamiento β3. Esta tendencia se repite para los Tamaños de Grano Fino (Figuras Nº71a), Medio (Figuras Nº71b) y Alto (Figuras Nº71c).

4.3.7.11.- Influencia de la Temperatura de Ensayo en el Módulo Secante

A continuación se grafica la influencia de la Temperatura de Ensayo en el Módulo Secante para los Tamaños de Grano Fino (Figura Nº72a), Medio (Figura Nº72b) y Grueso (Figura Nº72c).

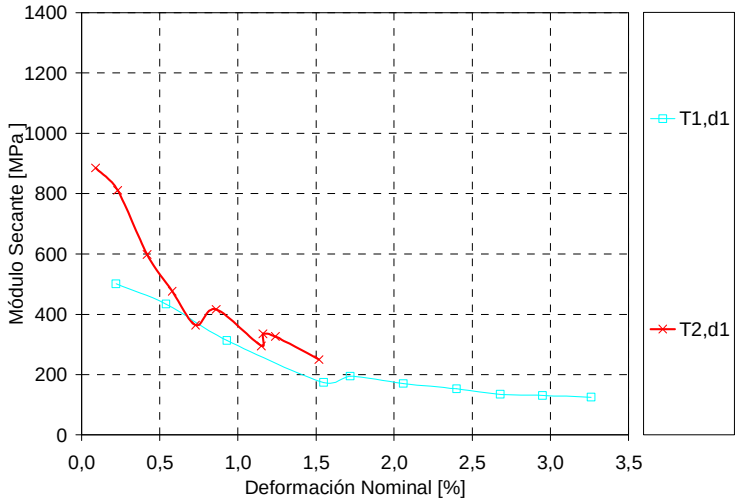


Figura Nº72a
Módulo Secante
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d3, Grueso.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

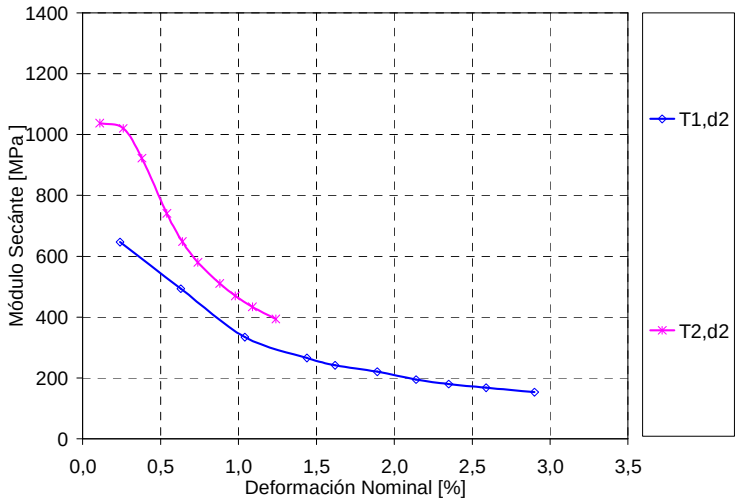


Figura Nº72b
Módulo Secante
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d3, Grueso.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

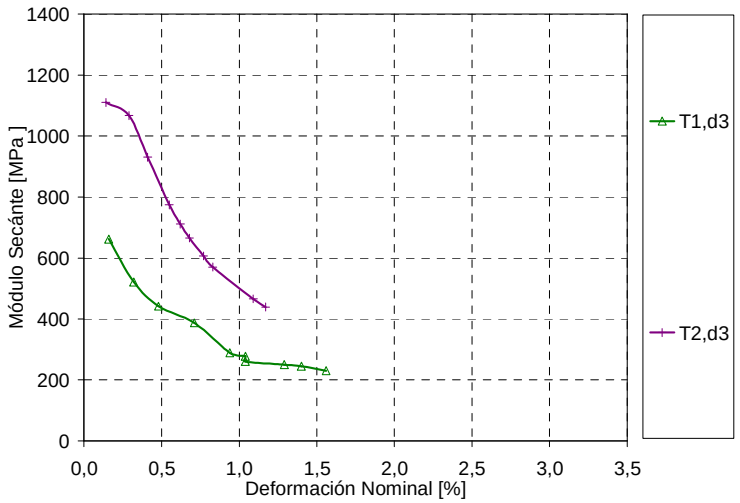


Figura Nº72c
Módulo Secante
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: d3, Grueso.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

Se puede observar que para una Amplitud de Deformación nominal impuesta a mayor Temperatura de Ensayo, mayor es el valor del Módulo Secante. Esta tendencia se repite para los Tamaños de Grano Fino (Figuras Nº72a), Medio (Figuras Nº72b) y Grueso (Figuras Nº72c).

4.3.7.12.- Influencia del Tamaño de Grano en el Módulo Secante

A continuación se grafica la influencia del Tamaño de Grano en el Módulo Secante para la Temperatura de Ensayo Media (Figura Nº73a) y Alta (Figura Nº73b).

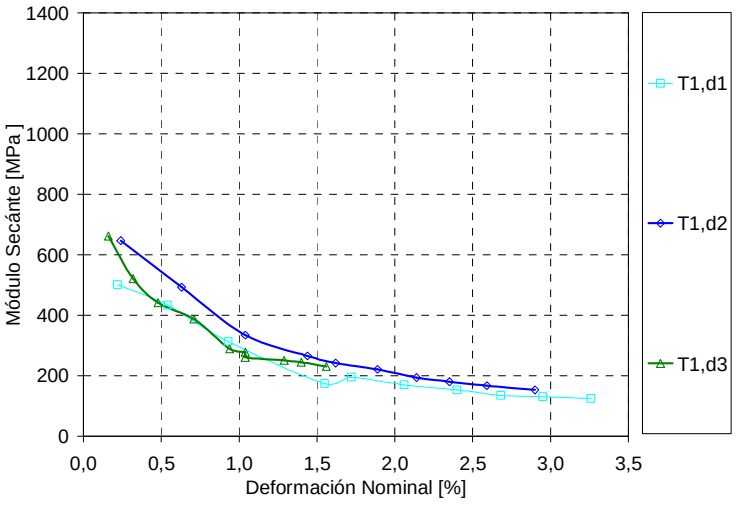


Figura Nº73a
Módulo Secante
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Temperatura de ensayo: T1, Media.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

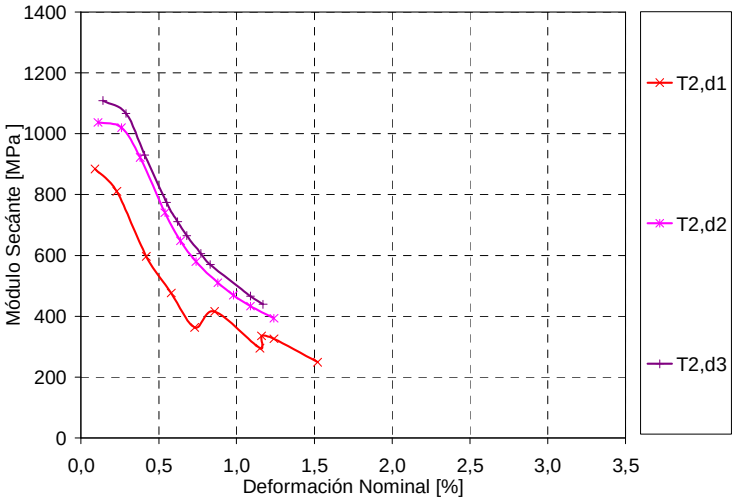


Figura Nº73b
Módulo Secante
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

Se puede observar que para una Amplitud de Deformación nominal impuesta a mayor Tamaño de Grano, mayor es el valor del Módulo Secante. Esta tendencia se repite para las Temperaturas de Ensayo Media (Figuras Nº73a) y Alta (Figuras Nº73b).

4.3.7.13.- Influencia del Tamaño de Grano en la Energía Disipada

A continuación se grafica la influencia del Tamaño de Grano en la Energía Disipada para la Temperatura de Ensayo Media (Figura Nº74a) y Alta (Figura Nº74b).

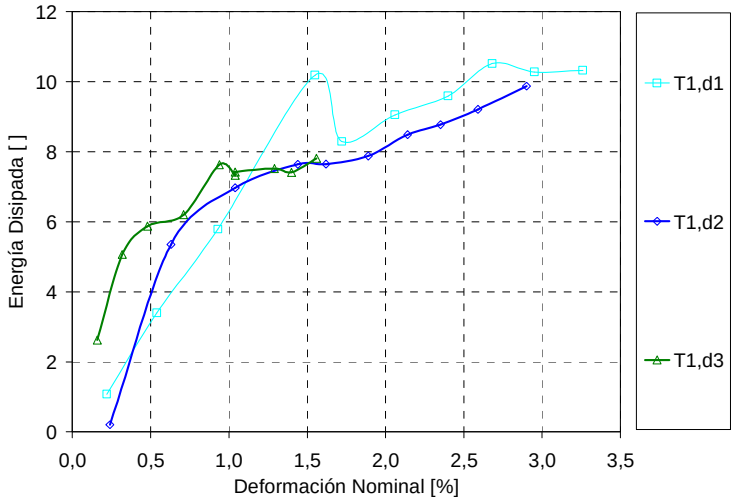


Figura Nº74a
Energía Disipada
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Temperatura de ensayo: T1, Media.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

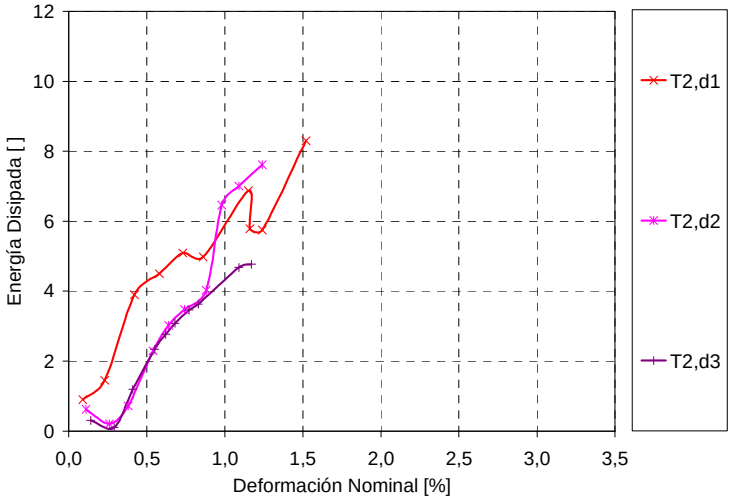


Figura Nº74b
Energía Disipada
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Temperatura de ensayo: T2, Alta.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

Se puede observar que para una Amplitud de Deformación nominal impuesta a mayor Tamaño de Grano, mayor es el valor de la Energía Disipada. Esta tendencia se repite para las Temperaturas de Ensayo Media (Figuras Nº74a) y Alta (Figuras Nº74b).

4.3.7.14.- Influencia de la Temperatura de Ensayo en la Energía Disipada

A continuación se grafica la influencia de la Temperatura de Ensayo en la Energía Disipada para los Tamaños de Grano Fino (Figura Nº75a), Medio (Figura Nº75b) y Grueso (Figura Nº75c).

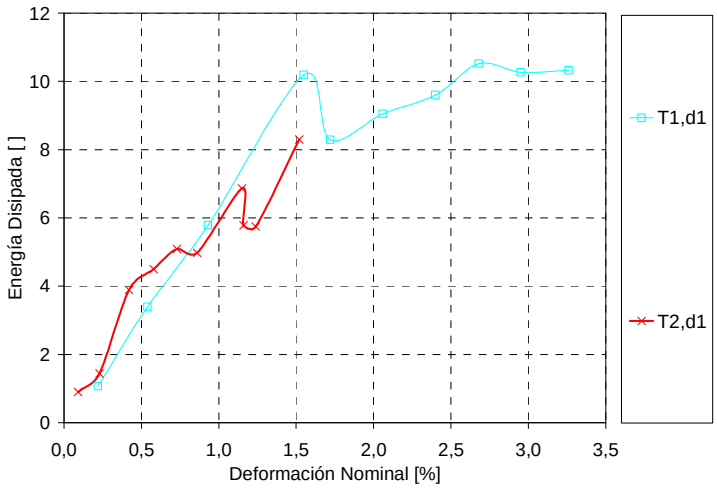


Figura Nº75a
Energía Disipada
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: Fino, d1.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

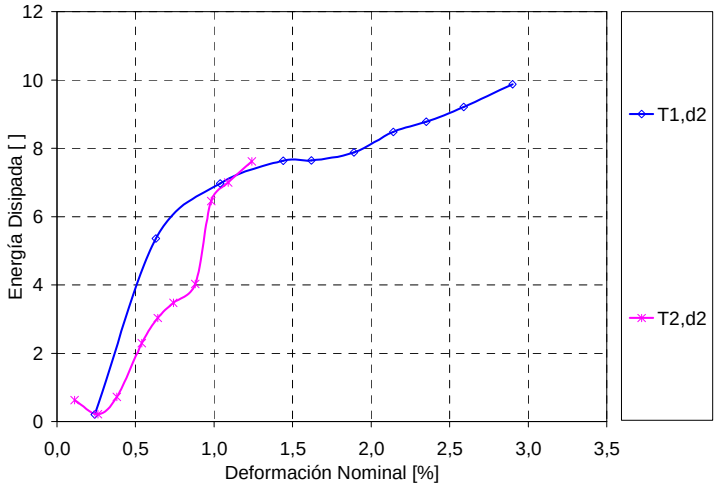


Figura Nº75b
Energía Disipada
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: Medio, d2.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

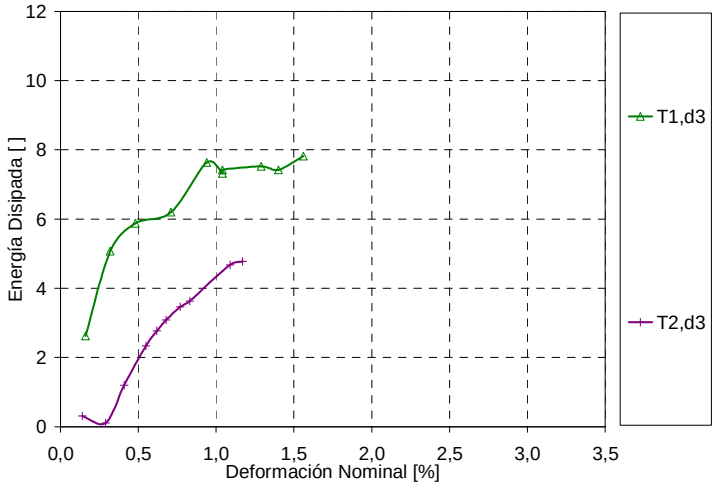


Figura Nº75c
Energía Disipada
Aleación: Cu-11,8%p.Al-0,5%p.Be
Tamaño de Grano: Grueso, d3.
Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz]
Número de Ciclos: 10

Se puede observar que para una Amplitud de Deformación nominal impuesta a menor Temperatura de Ensayo, mayor es el valor de la Energía Disipada. Esta tendencia se repite para los Tamaños de Grano Fino (Figuras Nº75a), Medio (Figuras Nº75b) y Grueso (Figuras Nº75c).

5.- DISCUSIÓN

5.1.- CONTROL POR DESPLAZAMENTO DEL CABEZAL

- La deformación impuesta en los ensayos cíclicos (nominal) no coincide con la deformación real de la probeta. Esto se debe básicamente a que la máqina empleó en el modo de control del recorrido del vástago. Así, la deforación de la máquina misma hace que la probeta sólo se deforme parcialmente.

- Para evitar la diferencia entre la deformación máxima nominal y la deformación máxima real, se debe controlar la deformación desde el extensómetro[7]. El motivo por el cual no se optó por esta alternativa es por la preocupación del ingeniero a cargo de la máquina solo la seguridad del extensómetro. En efecto, si durante el ensayo se produce una compresión y el exytensómetro se desliza con respecto de laprobeta, la áquina podría seguir efectuando cargay romper el instrumento.

5.2.- ENSAYO MONOTÓNICO

- Debido al comportamiento de la aleación bajo ensayos de tracción monotónicos (Ver figuras Nº 39a y 39b) en algunos casos fue posible determinar el esfuerzo de transformación de la aleación.

- Dado el punto anterior de discusión, no es posible determinar el Módulo de Módulo de Young.

[7] Instrumento para medir desplazamiento de una deformación por tracción o compresión de una probeta.

5.3.- ENSAYO CÍCLICO

Tamaño de Grano y Amplitud de Deformación

- El algoritmo de programación empleado para los ensayos cíclicos es a "deformación controlada", en relación con el recorrido del cabezal de la máquina cíclica. Los parámetros de entrada del programa son: distancia entre mordazas (L[mm]), distancia del extensómetro (l[mm]), diámetro de la probeta (D[mm]), frecuencia de oscilación (f[hz]), número de ciclos (n), amplitud máxima [%] y amplitud mínima [%][8]. Luego, la amplitud mínima se traduce en una predeformación para minimizar errores iniciales en el asentamiento de la probeta en las mordazas. Al ingresar la deformación máxima requerida, el programa traduce este porcentaje, según la distancia L entre mordazas, en el recorrido necesario del cabezal de la máquina, pero no considera la deformación de la máquina, por lo que el extensómetro solo registra parte de esta deformación.

- Una forma de representar lo que ocurre con la deformación entre la máquina y la probeta es simularlos con resortes:

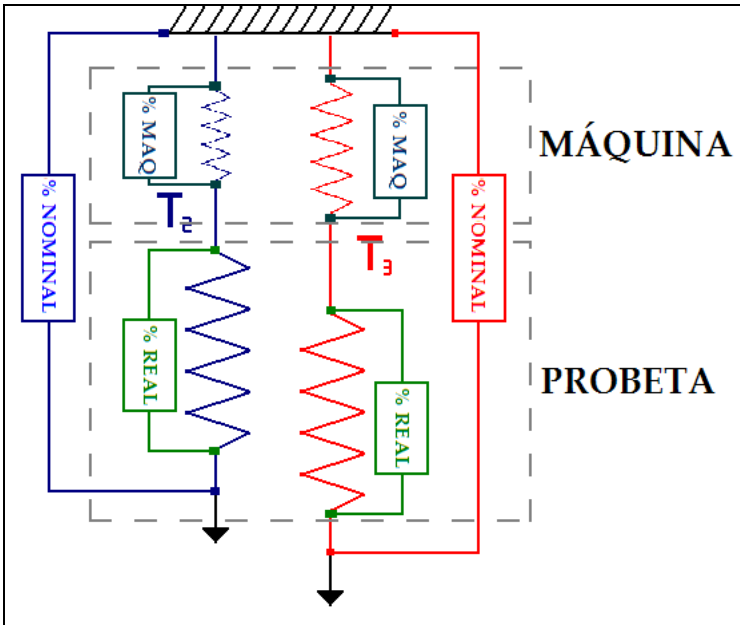


Figura Nº76
Diagrama análogo a la deformación registrada por instrumento. T1 < T2.
%REAL: deformación que registra el instrumento.
%MAQ: deformación que experimenta la máquina.
%NOMINAL: deformación impuesta.

[8] El algoritmo para calcular los esfuerzos v/s deformación se encuentra en el Anexo B

- El número de ciclos de cada serie graficados en a mayoría de las figuras corresponde a los primeros 2 ciclos. Ello porque el primero era diferente de los otros y porque el segundo ciclo era muy similar a la siguientes. En el Anezo A se presentangraficados todos los ciclo de las series de 10 ciclos.

- En las etapas de ensayo cíclico con deformación crecientes, el propósito era determinar el Límite Superior del rango superelástico. Esto no se logró debid a varios factores técnicos (superables) que no permtieronimponer la suficiente deformación en el extensómetro. En efecto, debido a los argumentos antes señalados solo una fracción de la deformación nominal orrespondía a la deformación real (extensómetro) Así, amodo de ejemplo una deformación nominal de 9 [%] correspondía a una deformación real de solo 3,2 [%]. Además, el valor de la deformación real se podía calcular solo al dia siguente del ensayo, teniéndo en cuenta también que la disponibilidad del equipo fue muy limitado.

- La diferencia entre la deformación nominal y real crecía al aumentar la temperatura de ensayo. Como se explicó, el esfuerzo de transformación aumenta con la temperatura, es decir, la probeta se transformaba en un resorte muy duro. Según el modelo de la figura Nº76, es claro que es un resorte más duro, correspondiente a una deformación menor.

Frecuencia de Oscilación en 10 ciclos

- Como se mencionó anteriormente, el aumento en el Tamaño de Grano incide en el comportamiento teóricamente esperado. En efecto, para un tamaño dado de probeta, a mayor tamaño de grano, menor debe ser la isotropia por compensación Esto se refleja en los gráficos Nº 56a y 56b. En el primer caso, el Tamaño de Grano es menor, por lo que la influencia esperada de la variable en estudio Frecuencia de Oscilación se ve reflejado: hay un aumento en los esfuerzos de transformación con el aumento de la frecuencia. Por otra parte, en la figura Nº56b, el Tamaño de Grano es mayor y no es clara la incidencia de la variable frecuencia de oscilación en los ensayos cíclos, sin embargo, existe un leve aumento en los esfuerzos de transformación con el aumento en la frecuencia de oscilación (de 0,5 a 1,0 [Hz]) para la Temperatura Ambiente y Tamaño de Grano Mediano.

Frecuencia de Oscilación en 100 ciclos

- El programa usado en el laboratorio para registrar los datos de esfuerzo versus deformación en los ensayo cíclico fue de 47,6 datos por ciclo para los ensayos de 10 ciclos. Para esta experiencia en particular, 100 ciclos, se redujo el número de datos registrados por ciclo debido a la falta de capacidad del sistema de almacenar datos. Así, para este ensayo de 100 ciclos los datos que se registraron fue de 13,63 datos por ciclo.

Curva Envolvente

- El ensayo para una deformación del 2 [%] nominal no siguió la tendencia con respecto a los otros ensayos (figura Nº41c). Esta anomalía es posible que se deba a un error en la fijación de cero en esfuerzo par ese ensayo.

- En la figura Nº54a se puede observar que la curva de tracción (color verde) y la curva envolvente (color rojo) coinciden en el rango elástico (igual Módulo de Young), por lo que se verifica el correcto dimensionamiento.

Energía

- Las Tablas de Resultados de Energía en los Ensayos Cíclicos (Tablas Nº9, 10, 11, 12, 13 y 14) para los distintos Tamaños de Grano (Fino, Medio y Grueso) y Temperaturas de Ensayo (Media y Alta) fueron obtenidos del Software MATLAB. Los parámetros de entrada fueron los esfuerzos y deformaciones de los ciclos (10 ciclos) y el programa, por medio de un algoritmo dado (ver Anexo) calcula los 3 factores de amortiguamiento, las áreas bajo la curva, la energía disipada y los módulos elásticos y secantes.

- Los valores que aparecen en las Tablas anteriormente señaladas son el promedio de 10 valores (correspondiente a los 10 ciclos en cuestión) por cada deformación nominal. Por ejemplo, la deformación nominal 2,6 [%], Temperatura de Ensayo Media (Ambiental) y Tamaño de Grano Fino (64,5 [μm]) los valores obtenidos fueron:

6.- CONCLUSIONES

6.1.- VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO

- Se determinó el Tratamiento Térmico (temperatura y tiempo de recocido) para generar los 3 tipos de Tamaños de Grano: Tamaño de Grano Fino, Medio y Grueso. Las Temperatura y el Tiempo asociado son los siguientes:

$$Sin_Tratamiento_Térmico \Rightarrow d_1 = 64{,}5[\mu m]$$
$$T = 750[^{o}C] \wedge t = 35[s] \Rightarrow d_2 = 95{,}2[\mu m]$$
$$T = 750[^{o}C] \wedge t = 45[s] \Rightarrow d_3 = 250[\mu m]$$

6.2.- ENSAYOS MONOTÓNICOS

Ensayos Realizados

- Los Ensayos Monotónicos que se realizaron para el estudio del comportamiento de la aleación fueron los siguientes:

Tabla Nº16
"Ensayos Monotónicos realizados"

Número de Ensayo	Tamaño de Grano [micrón]	Temperatura de Ensayo [ºC]
1	$d_1 = 64{,}5$	$T_2 = 20$
2	$d_1 = 64{,}5$	$T_3 = 50$
3	$d_2 = 95{,}2$	$T_2 = 20$
4	$d_2 = 95{,}2$	$T_3 = 50$
5	$d_3 = 250$	$T_2 = 20$
6	$d_3 = 250$	$T_3 = 50$

Influencia de la Temperatura en el Comportamiento Mecánico

- El material presenta mayores esfuerzos de transformación a mayores temperaturas de ensayo. Esto se debe a que el esfuerzo de fluenza depende directamente de la temperatura: $\uparrow T \Rightarrow \uparrow \sigma_t$.

Influencia del Tamaño de Grano en el Comportamiento Mecánico

- El Tamaño de Grano influye en el comportamiento mecánico del material. A menor Tamaño de Grano, más homogénea es la estructura interna de la aleación, por lo que en los gráficos se distingue el rango elástico y plástico, junto con los esfuerzos de rotura, deformaciones máximas. Al aumentar la temperatura de recristalización, el Tamaño de Grano de los granos grandes (iniciales) crecen, mientras que los granos menores (iniciales) disminuyen hasta desaparecer. Debido a esto, al aumetar el tiempo de recristalización existe una mayor diferencia entre los granos mayores y los menores, por lo que las propiedades cambian por falta de homogeneidad en la estructura cristalina interna. Así, el comportamiento es más estable mientras menor sea el Tamaño de Grano, en este caso, d = d1 = 64,5 [μm] (Tamaño de Grano inicial de la aleación).

6.3.- ENSAYOS CÍCLICOS

Influencia de la Amplitud de Deformación en el Comportamiento Superelástico

- El material en estudio se comportó como una aleación superelástica en el rango de deformación ensayada, vale decir, hasta 3,3 [%] de deformación real (lo que equivale a 9 [%] de deformación nominal impuesta). En efecto, según los gráficos de la figura Nº49a, 49b, 49c, 50a, 50b y 50c (curvas de Deformación I, II y III), no hay deformación remanente en los ensayos cíclicos para la aleación en estudio, para las Temperaturas y Tamaños de Grano considrados,1 [Hz] y n=10 ciclos.

Influencia de la Temperatura en el Comportamiento Superelástico

- A mayores Temperaturas de ensayo, el material presentó mayores esfuerzos e transformación según lo teóricamente esperado.

Influencia del Tamaño de Grano en el Comportamiento Superelástico

- El Tamaño de Grano promedio incide en el comportamiento de la aleación. A medida que el Tamaño de Grano en la aleación disminuye, el comportamiento del material se ajusta a lo teóricamente predecible. En efecto, para un tamaño dado de probeta, a mayor tamaño de grano, menor debe ser la isotropia por compensación. Sin embargo, no se registran deformaciones remanentes considerable, por lo que el material mantuvo su comportamiento superelástico. A pesar de esto, se sugiere usar el material con Tamaño de Grano Fino.

Influencia de la Frecuencia de Oscilación en el Comportamiento Superelástico

- Existe un aumento en los esfuerzos con el aumento en la frecuencia de oscilación de 0,5 a 2 [Hz], a Temperatura Ambiente y Alta, 10 y 100 ciclos. A pesar de este cambio de frecuencia, no se registran deformaciones remanentes considerables, por lo que la aleación mantuvo su comportamiento superelástico.

Influencia del Número de Ciclos en el Comportamiento Superelástico

- En la Figura Nº58 se observa que con n=100 ciclos, y para frecuencia de 0,5 y 1 [Hz], es claro que los ciclos se van desplazando al aumentar el valor de n durante una serie; así es como para una deformación correspondiente al punto medio de la curva de carga, los ciclos están comprendidos en un banda vertical de unos 40 [MPa] de ancho. También en esta figura se ratifica que a mayor frecuencia, mayor es el esfuerzo de transformación.

Parámetros de Comportamiento Cíclico

- En la memoria se presentan resultados de la dependencia de los distintos parámetros del material en función de la temperatura, Tamaño de Grano y Amplitud de Oscilación. Estos parámetros son:
  - Energía Disipada
  - Coeficiente de Amortiguamiento
  - Módulo Secante

REFERENCIAS

[1] S. Montecinos, M. O. Moroni y A. Sepúlveda. "Superelastic behavior and damping capacity of Cu-Al-Be alloys", de ”Materials Sc. and Engine”, in press (2005).

[2] K. Otsuka y C.M. Wyman, "Shape Memory Materials", Capítulos 1 y 2, Cambridge University Press 1998.

[3] Muñoz, R. 2004. "Microestructura y Comportamiento Mecánico de aleaciones base Cobre Superelásticas sometidas a distintos tratamientos termomecánicos". Memoria para optar al título de ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

[4] Saldivia, R. A. 2000. "Fabricación y Ensayo de barras de Cobre con Memoria de Forma (SMA) Superelásticas". Memoria para optar al título de ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

[5] Golott, P. 2003. "Fabricación y ensayo de aleaciones de Cobre con memoria de forma (SMA) superelásticas". Memoria para optar al título de ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

[6] Monsalve, A. 1990. “Desarrollo de aleaciones con Memoria de Forma". Memoria para optar al título de ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

[7] De la Flor, S. 1999. "Aleaciones con Memoria de Forma".

[8] Mir, C. 2005. "Efecto del Tamaño de Grano y Temperatura sobre el comportamiento superelástico de una aleación Cu-Al-Be". Memoria para optar al título de ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

[9] Dolce, M; Cardone, D. “Mechanical Behavior or Shape Memory Alloys for Scismic Applications. Austenite NiTi wire subjected to Tension”, International Journal of Mechanical Science Nº43, 2001.

[10] Palma, Rodrigo. “Apunte Resumen Comportamiento Clásico de Creep”, apuntes de clases del curso “Metalurgia Mecánica”, código ME42B, Semestre Primavera, año 2003.

[11] DesRoches, R.; McCormick, J; Delemont, M. “Cyclic Properties of Superelastic Shape Memory Alloy Wire and Bars”, Journal of Structural Engineering, Vol 130, Nº1, p. 38-46, January 2004.

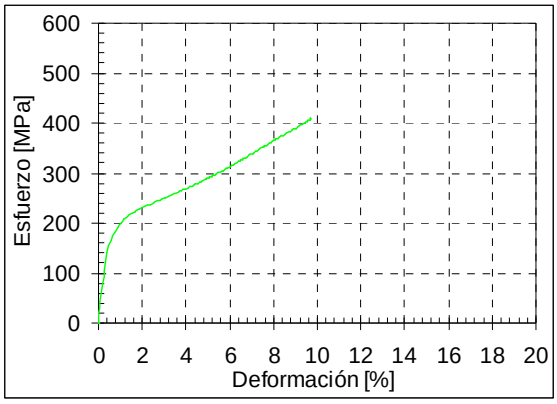
[12] Chopra, A. “Dynamics of Structures, Theory and Applications to Eartquake Engineering”, Second Edition, 2001.

[13] Sia Nemat – Jeom Yong Choi, “Strain rate dependence of deformation mechanisms in a Ni-Ti- Cr shape – memory alloy”. Disponible en www.sciencedirect.com

ANEXO A

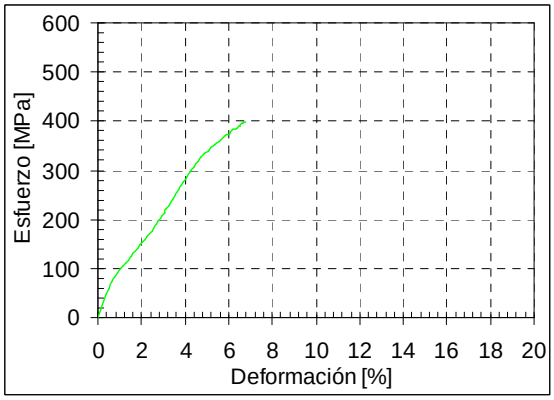
Ensayos Monotónicos

Temperatura de Ensayo: Media



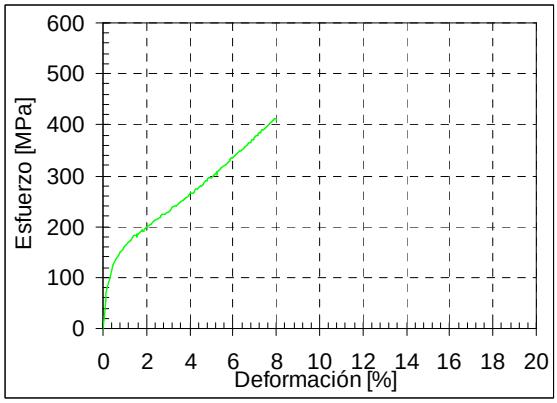
Tamaño de Grano Fino

Figura A



Tamaño de Grano Medio

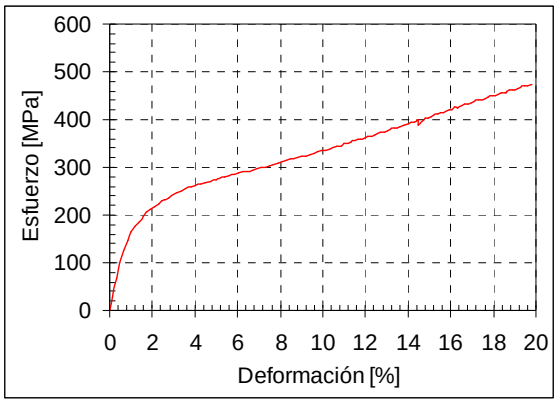
Figura A



Tamaño de Grano Grueso

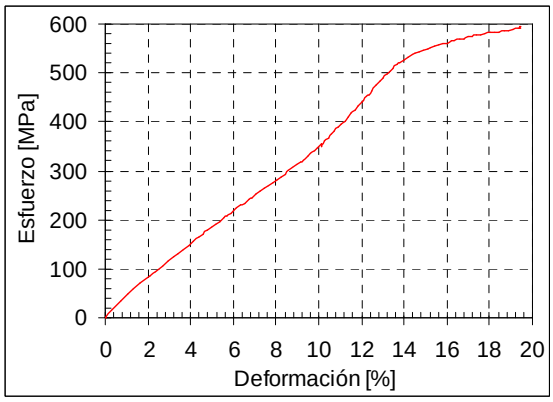
Figura A

Temperatura de Ensayo: Alta



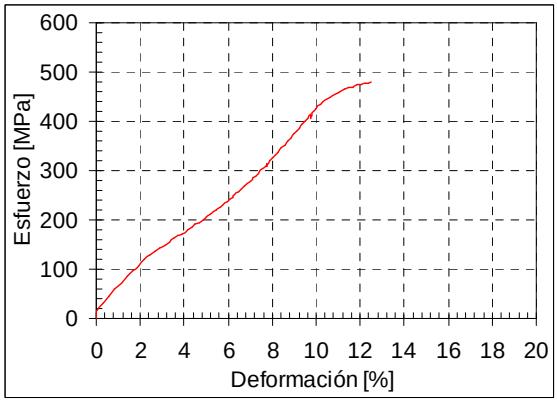
Tamaño de Grano Fino

Figura A



Tamaño de Grano Medio

Figura A

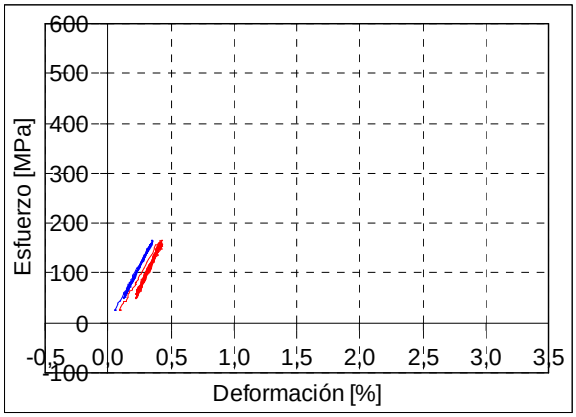


Tamaño de Grano Grueso

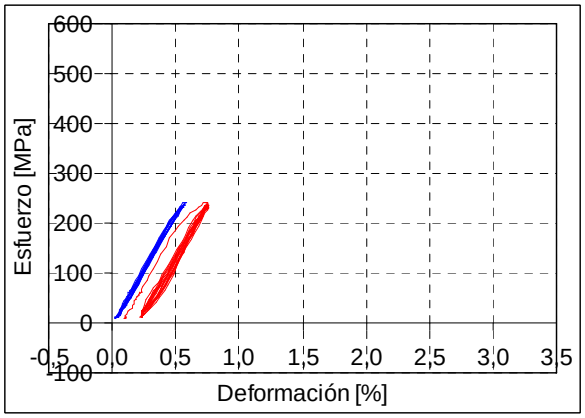
Figura A

Ensayos Cíclicos: Variación de la Amplitud de Deformación

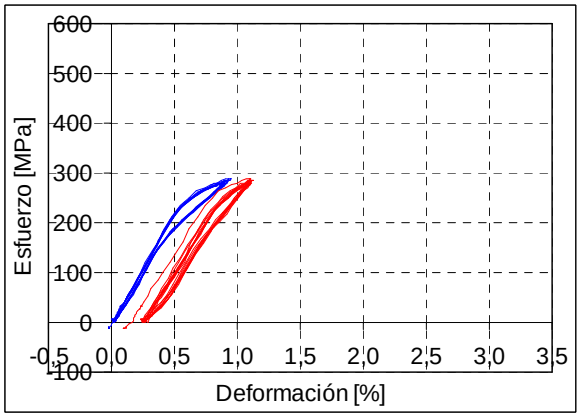
Temperatura de Ensayo: Media
Tamaño de Grano: Fino



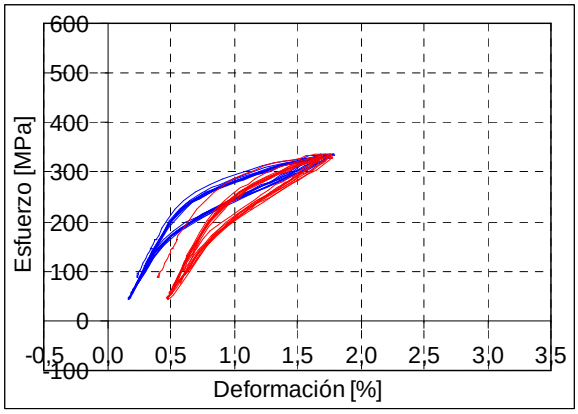
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A1



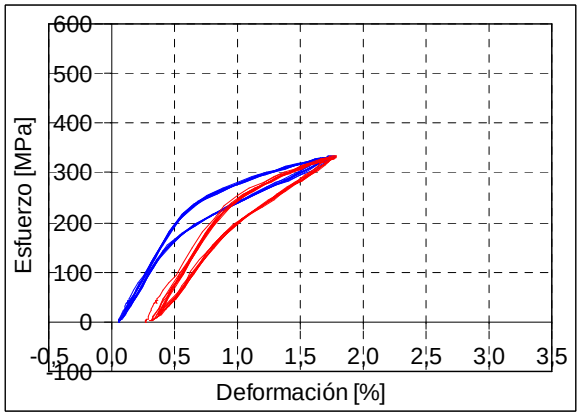
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A2



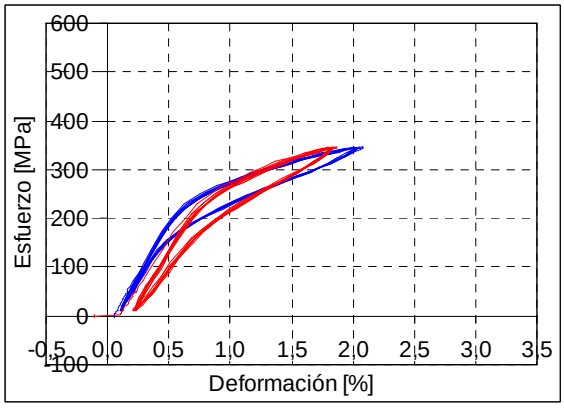
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A3



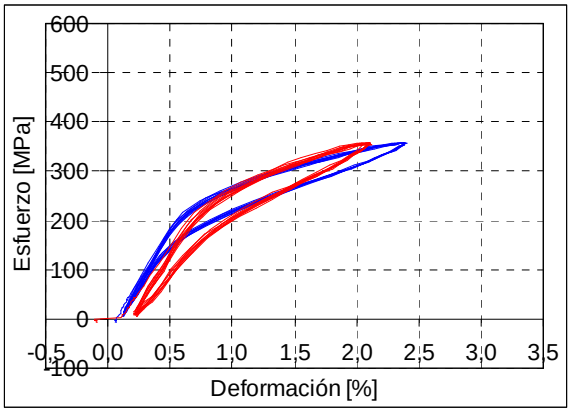
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A4



Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A5

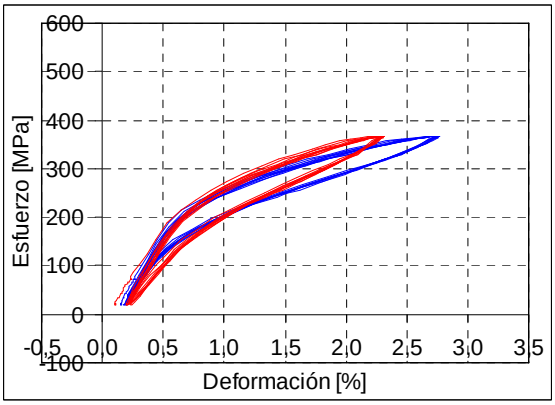


Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A6



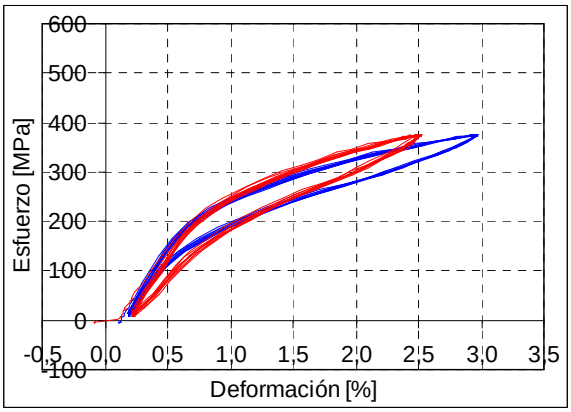
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A7



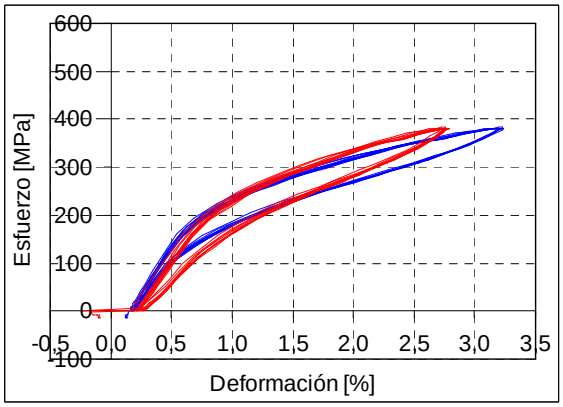
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A8



Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

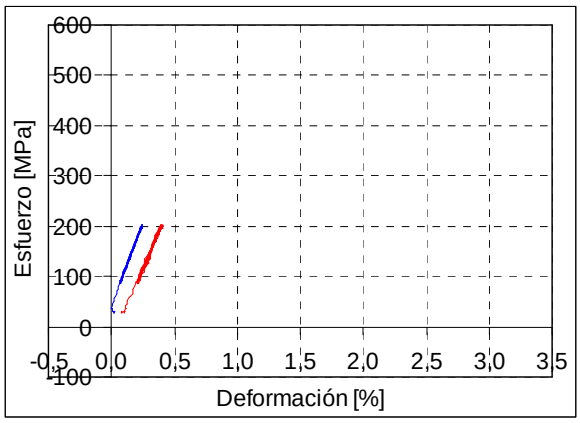
Figura A9



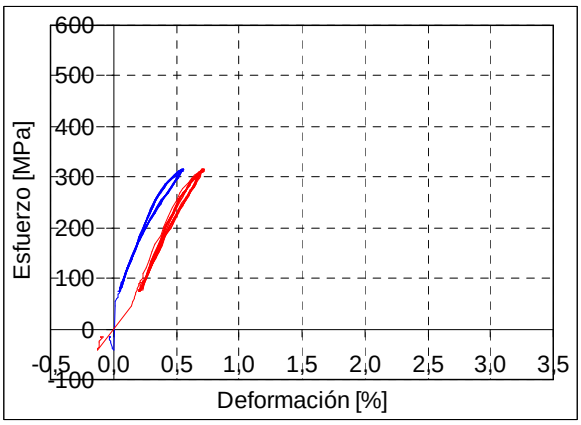
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A10

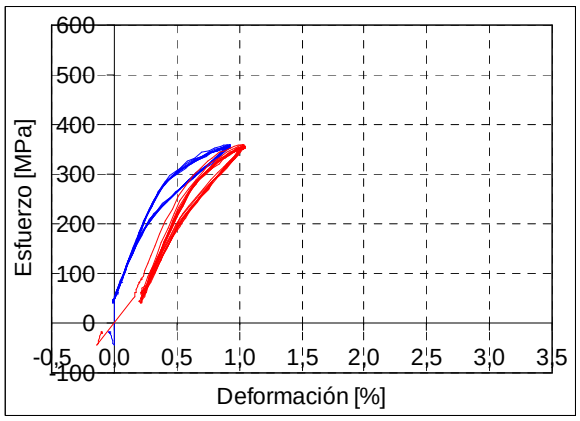
Temperatura de Ensayo: Media
Tamaño de Grano: Medio



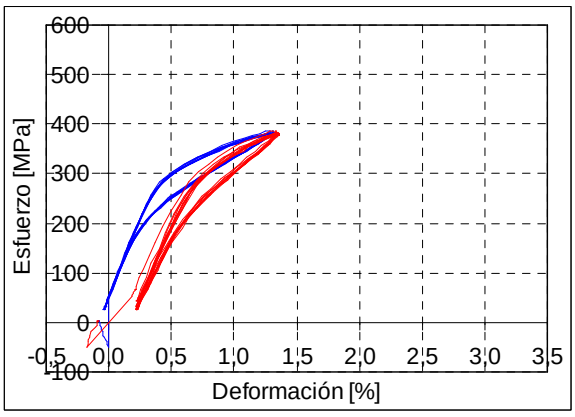
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A11



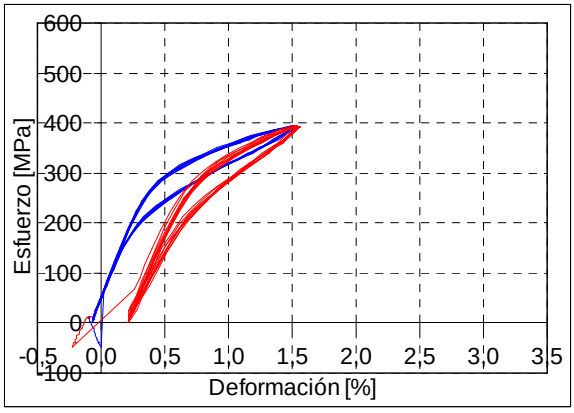
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A12



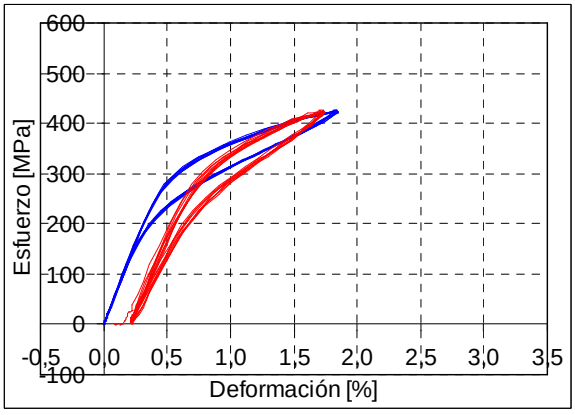
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A13



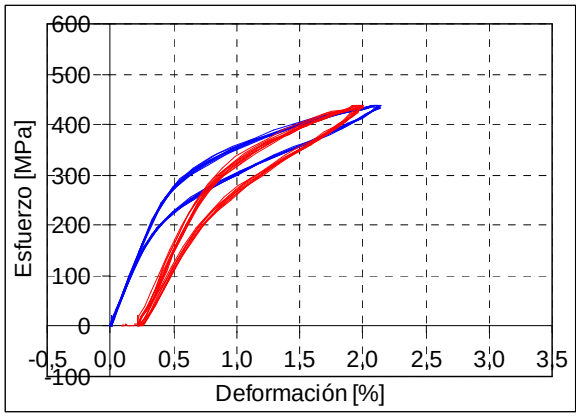
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A14



Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A15

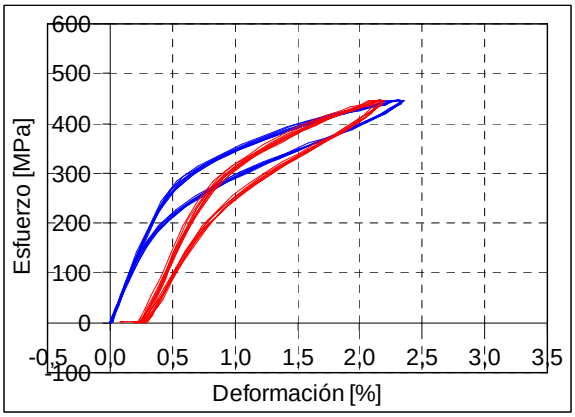


Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A16



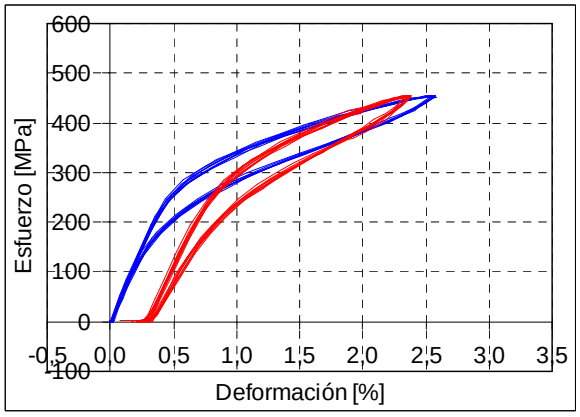
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A17



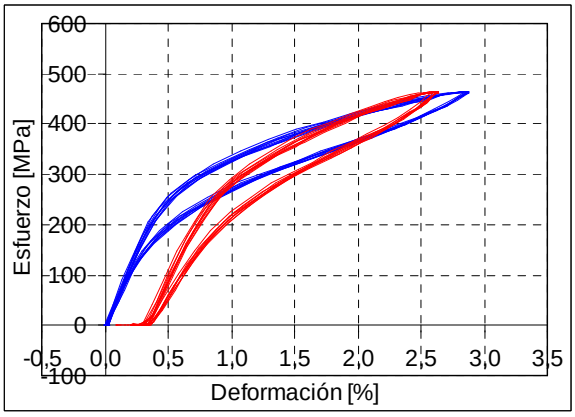
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A18



Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

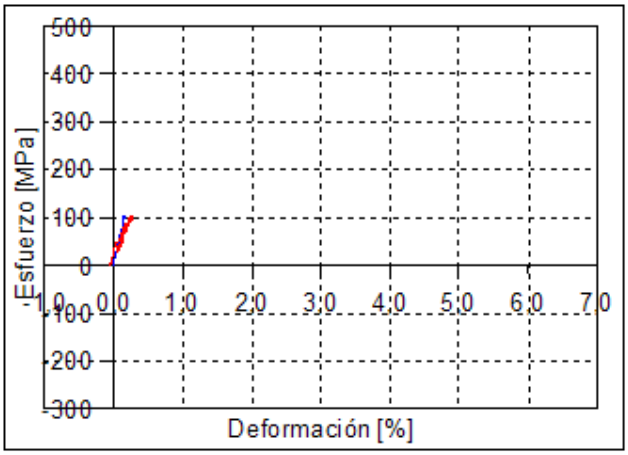
Figura A19



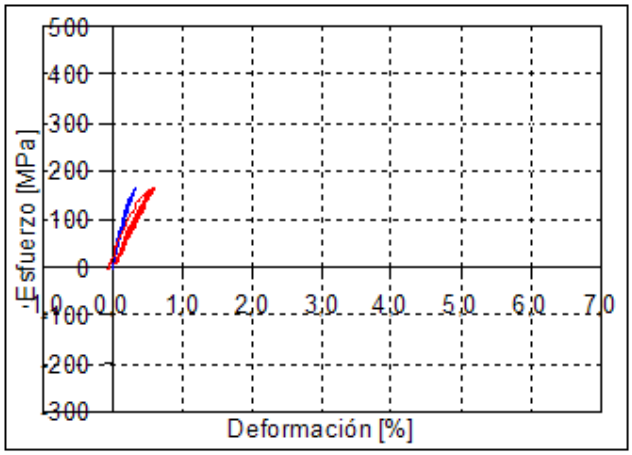
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A20

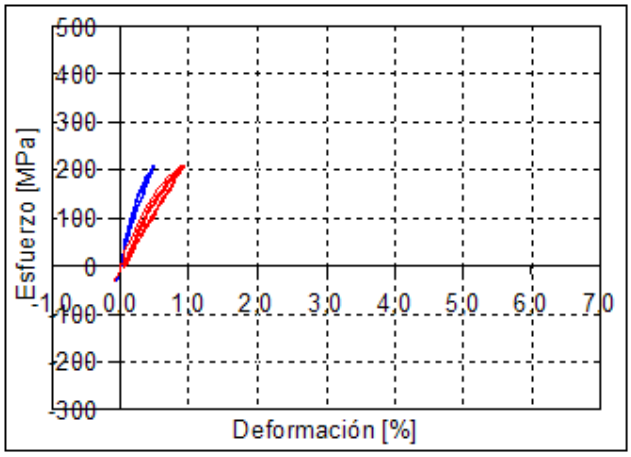
Temperatura de Ensayo: Media
Tamaño de Grano: Grueso



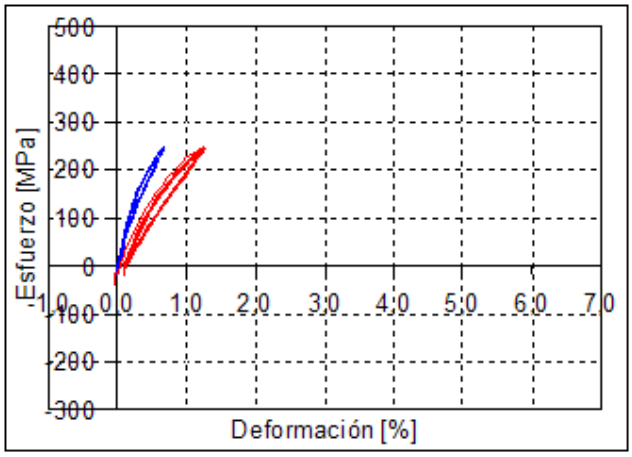
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A21



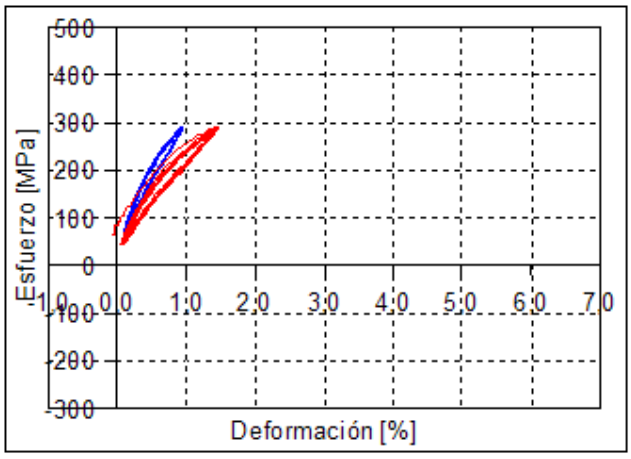
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A22



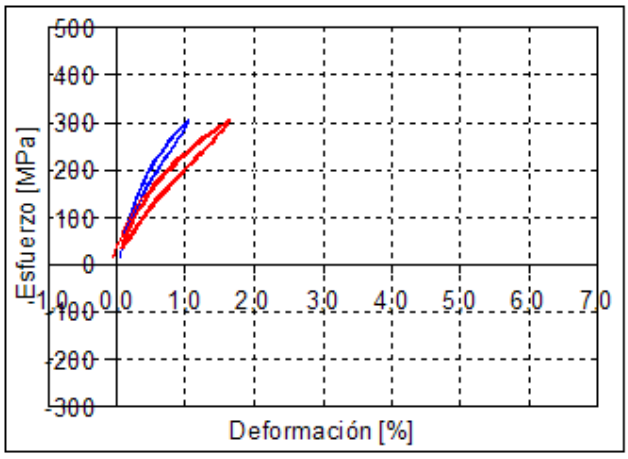
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A23



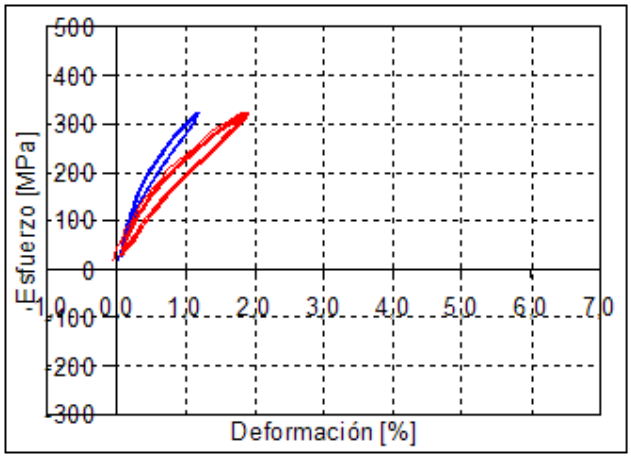
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A24



Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A25

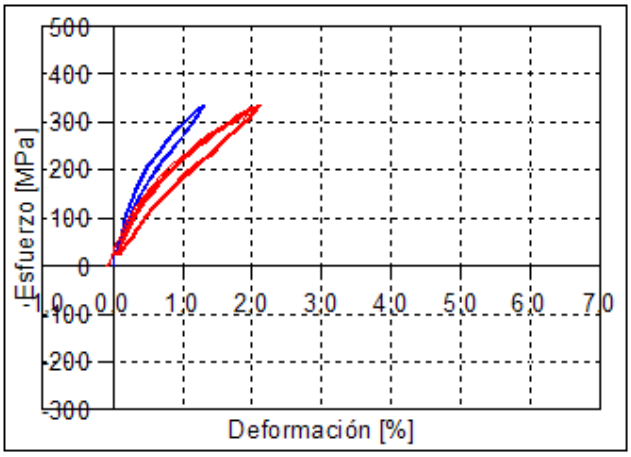


Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A26



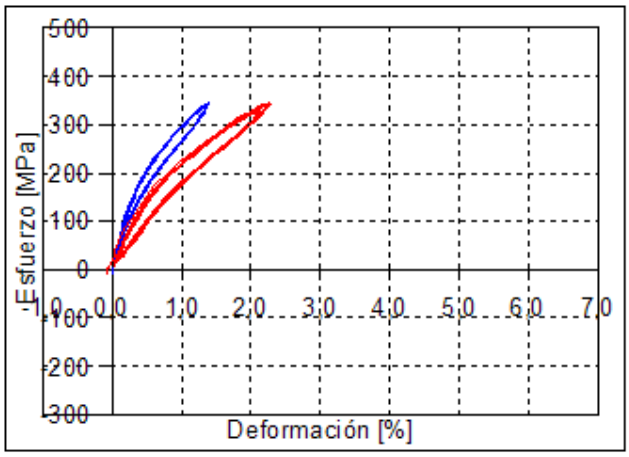
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A27



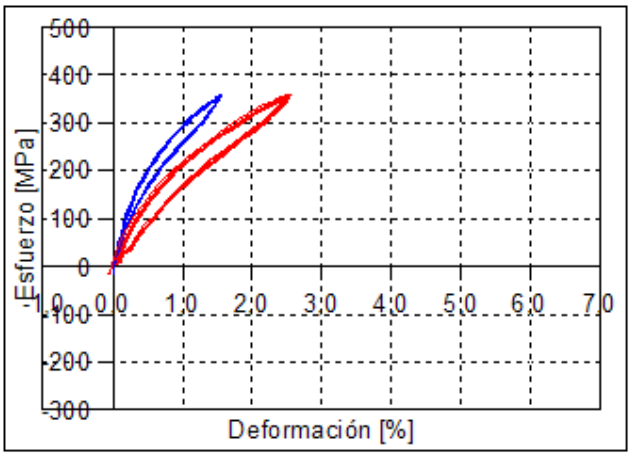
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A28



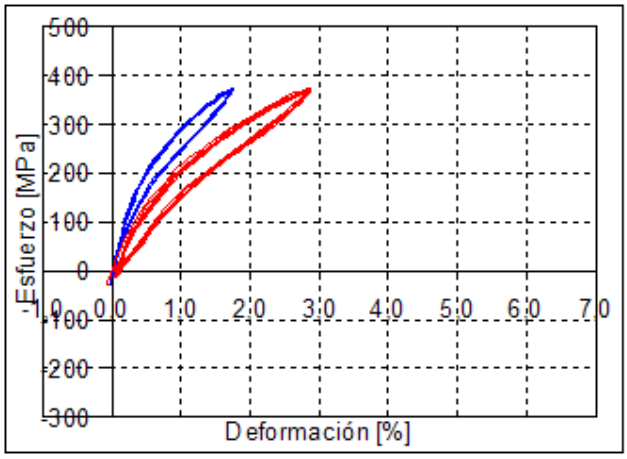
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A29



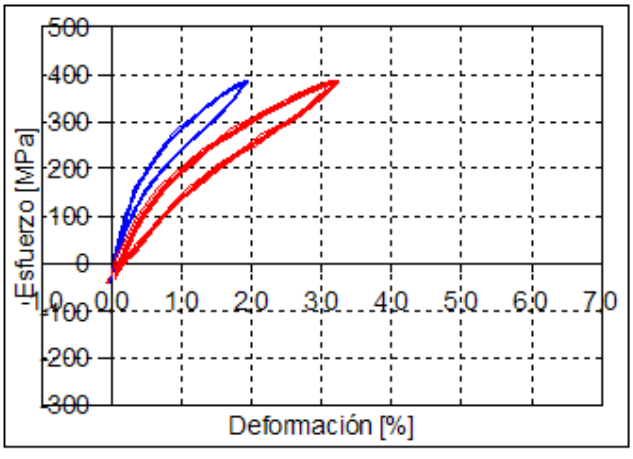
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A30



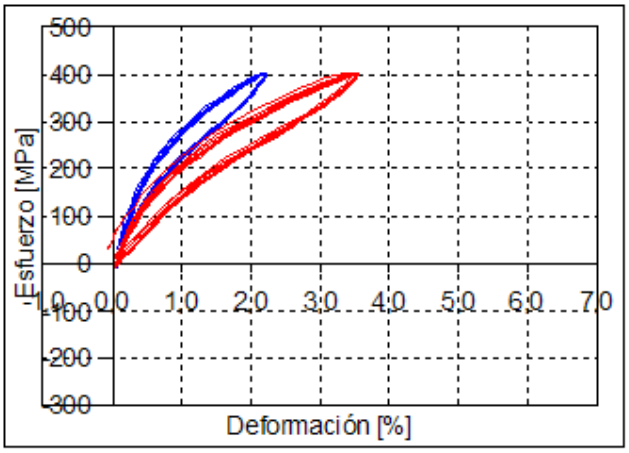
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A31



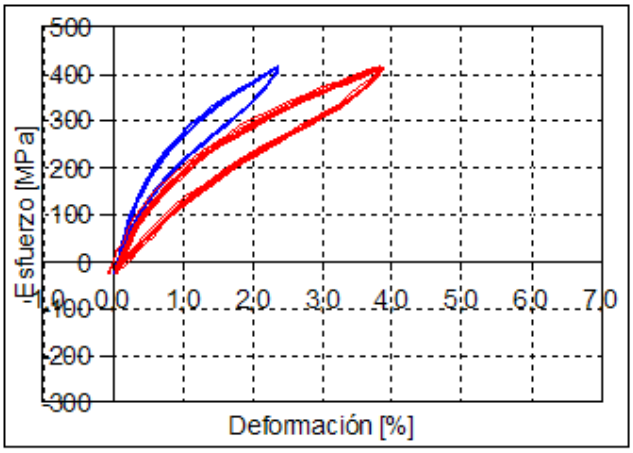
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A32



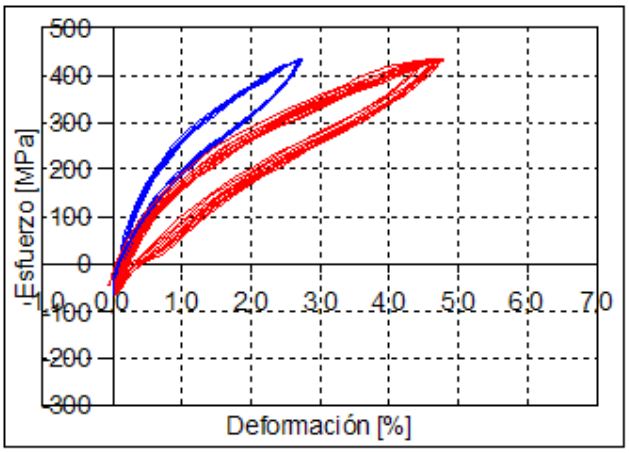
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A33



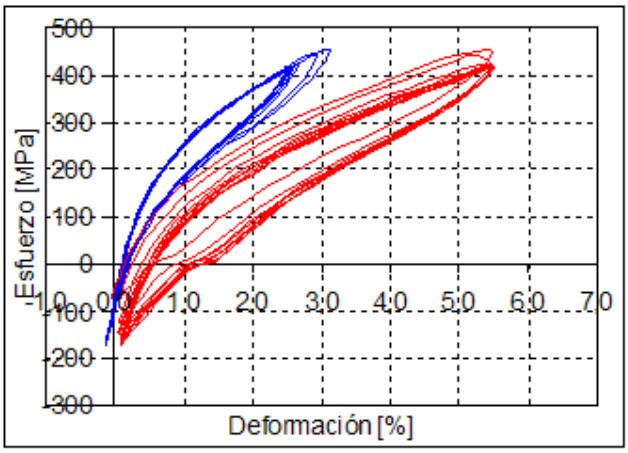
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A34



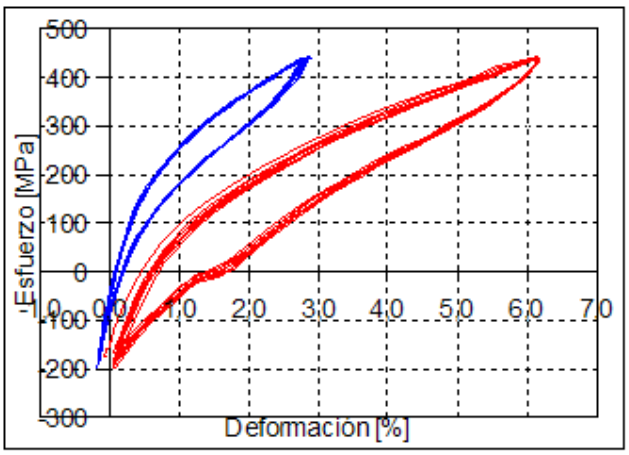
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A35



Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

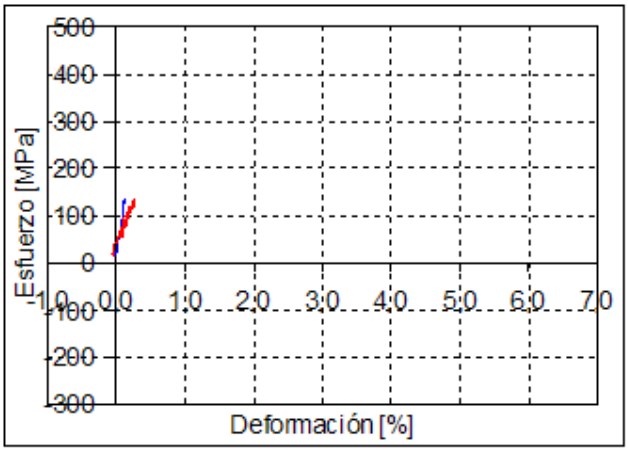
Figura A36



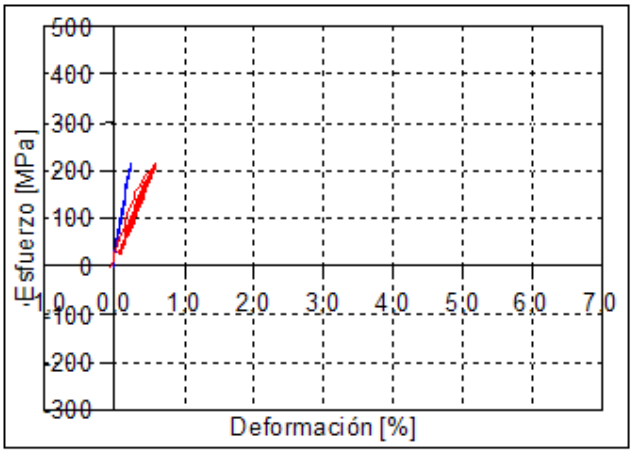
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A37

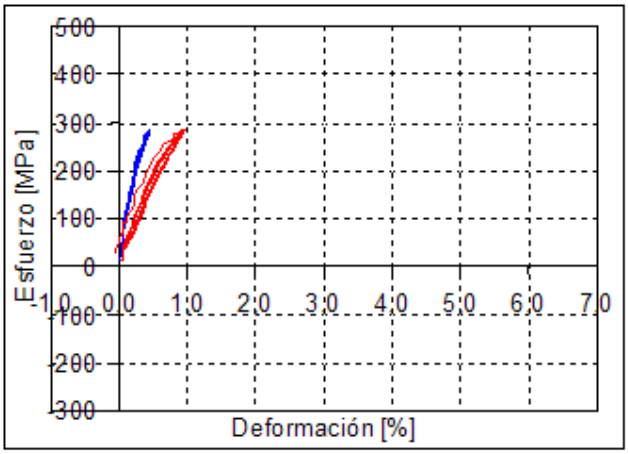
Temperatura de Ensayo: Alta
Tamaño de Grano: Fino



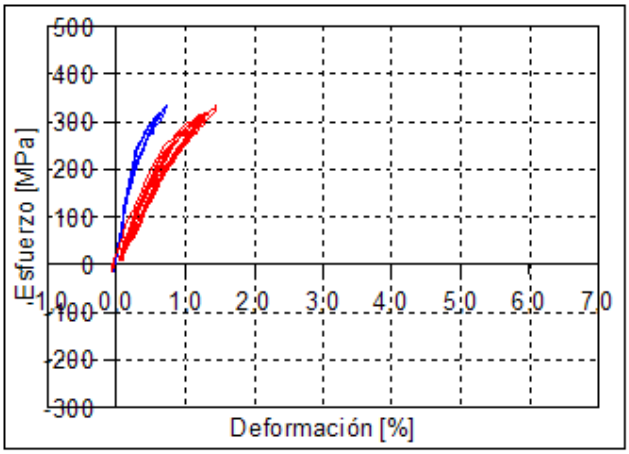
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A38



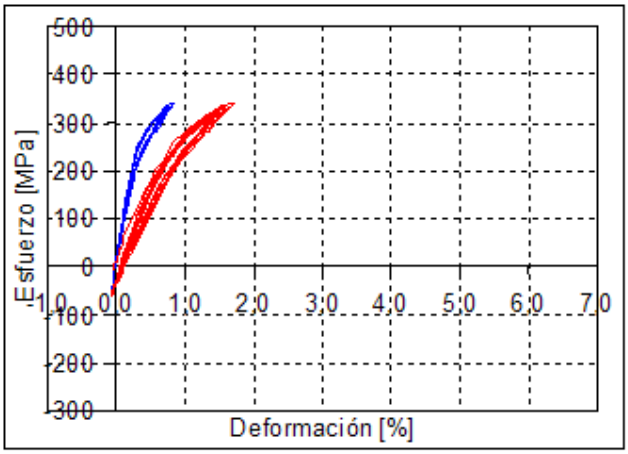
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A39



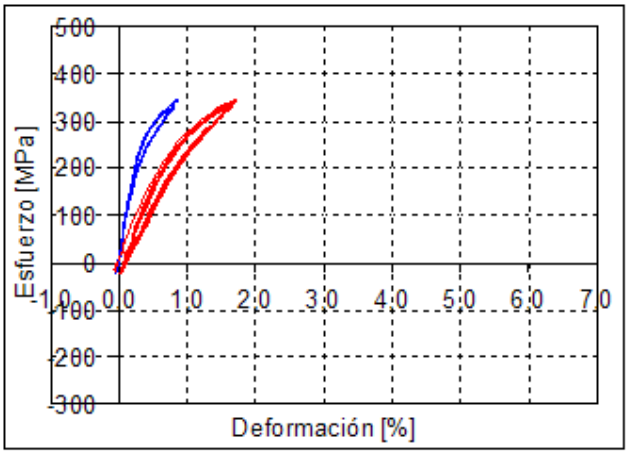
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A40



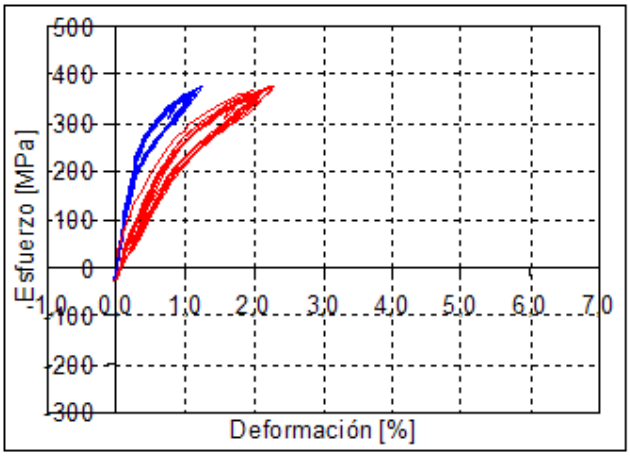
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A41



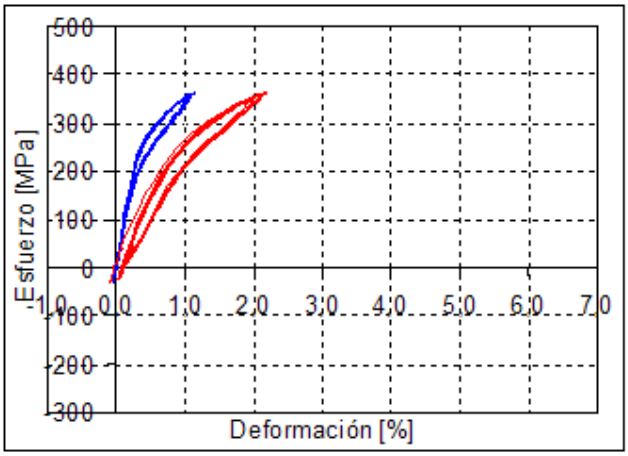
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A42



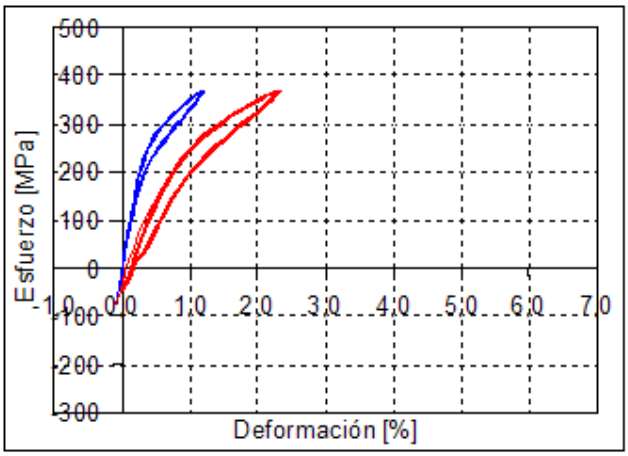
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A43



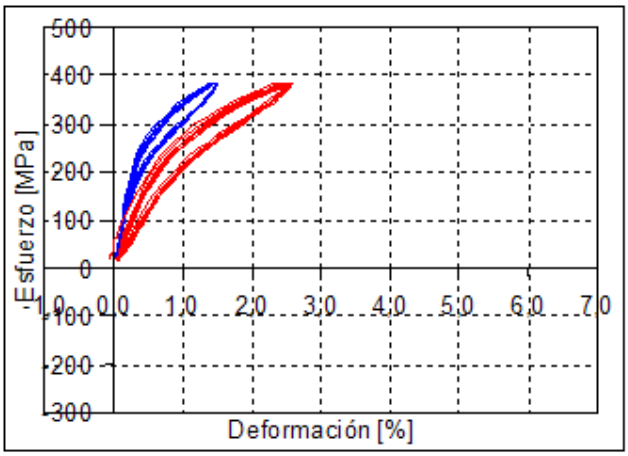
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A44



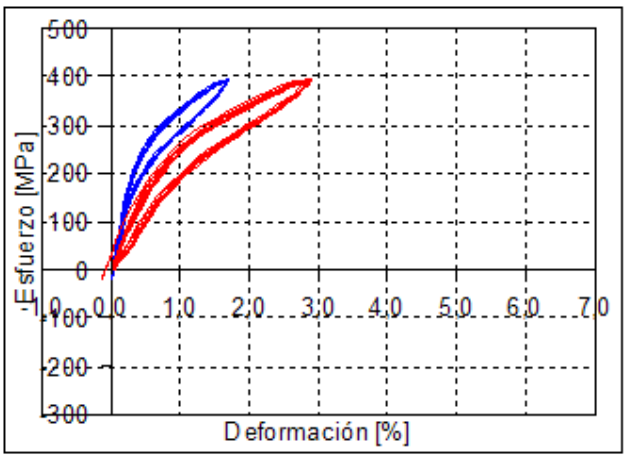
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A4



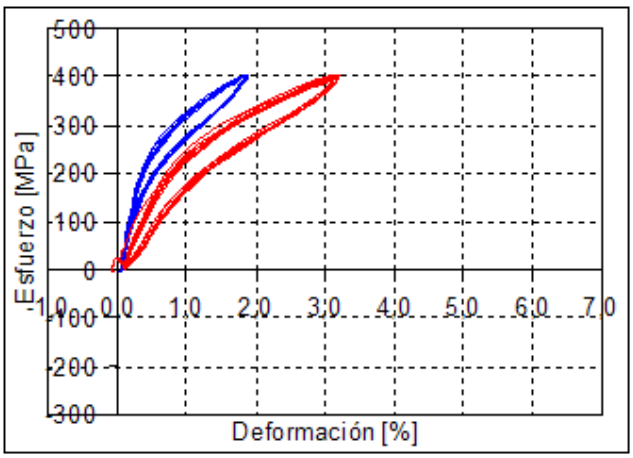
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A46



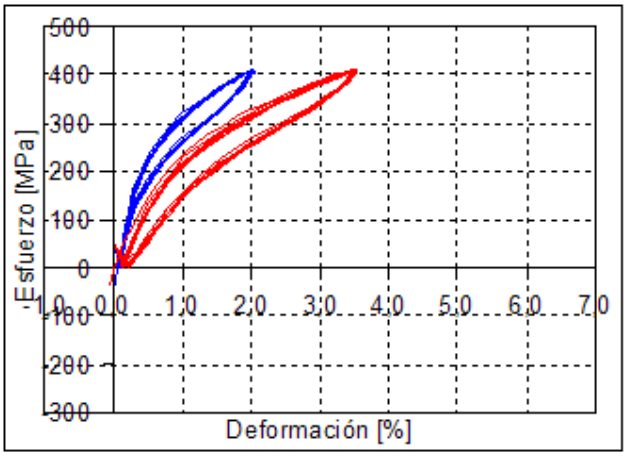
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A47



Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A48

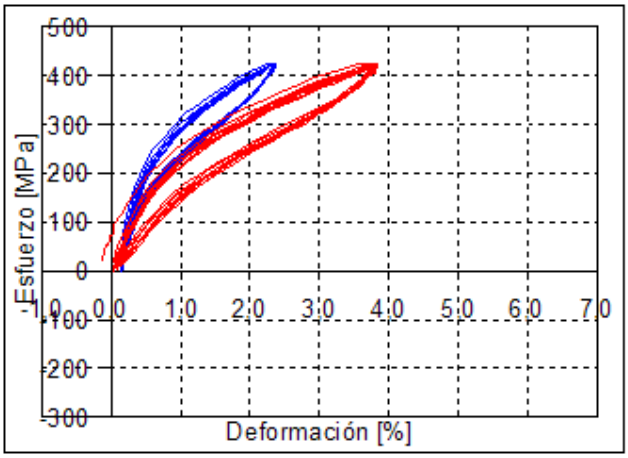


Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A49



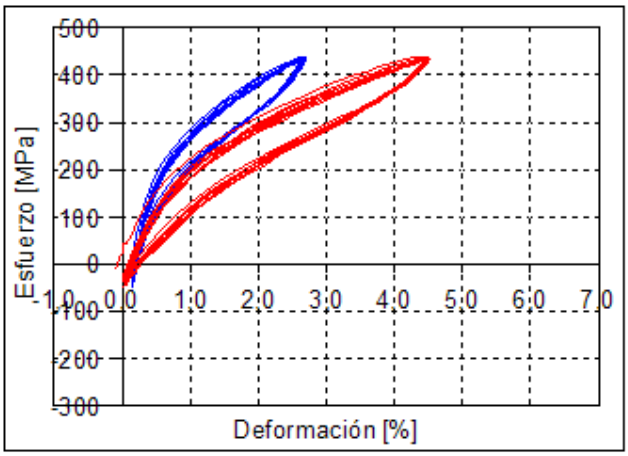
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A50



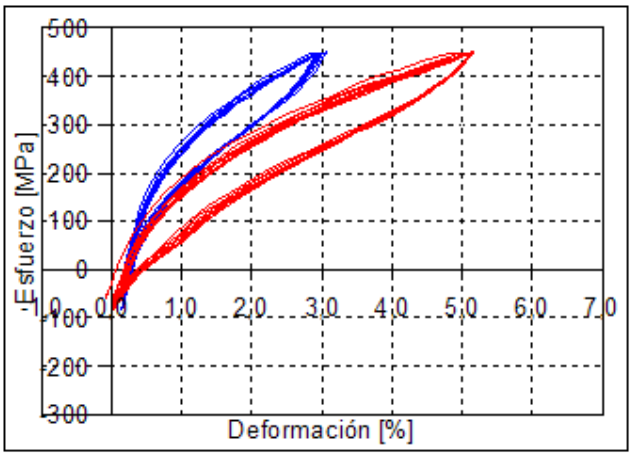
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A51



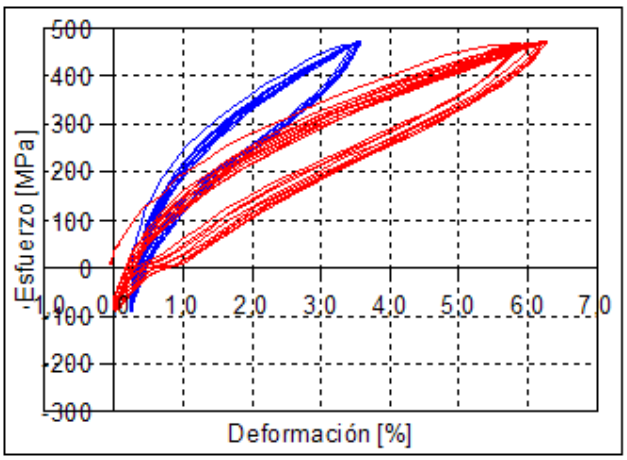
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A52



Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

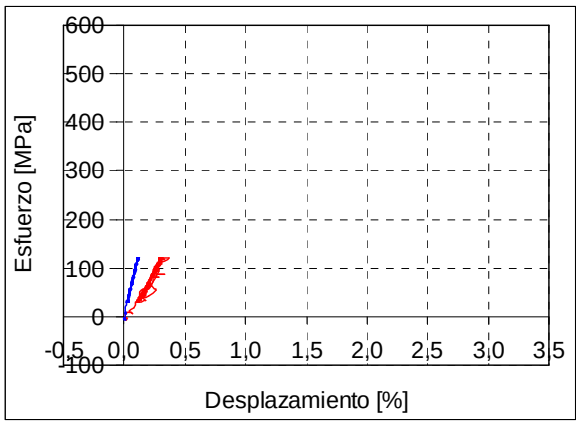
Figura A53



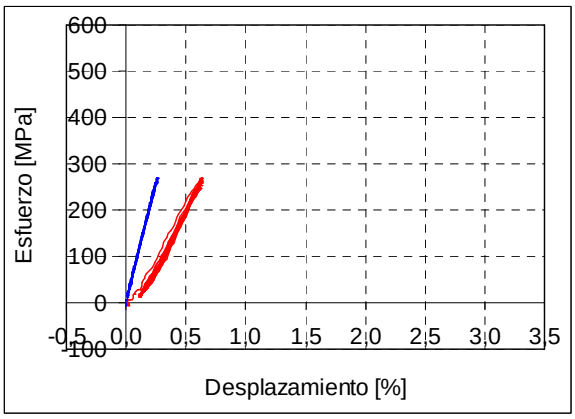
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A54

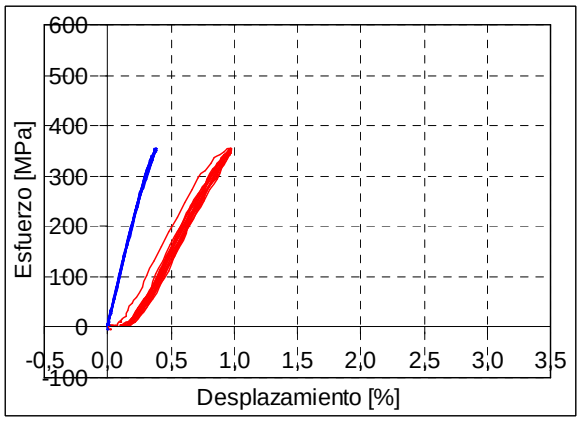
Temperatura de Ensayo: Alta
Tamaño de Grano: Medio



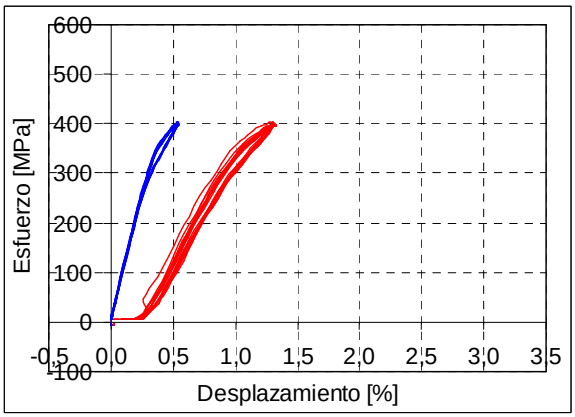
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A55



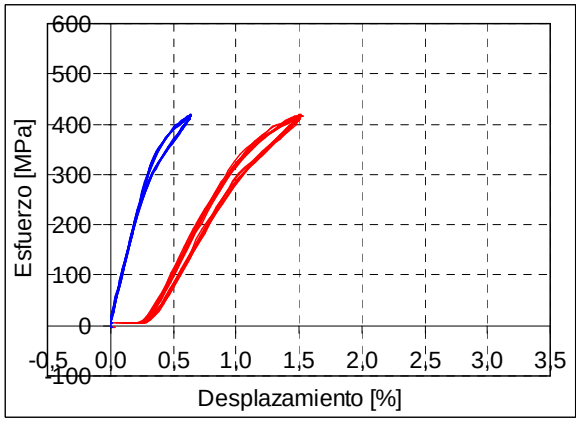
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A56



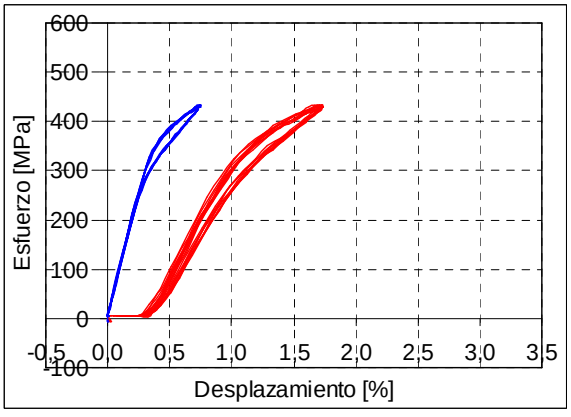
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A57



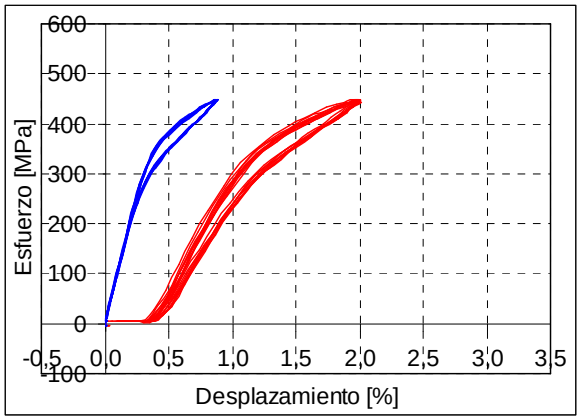
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A58



Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A59

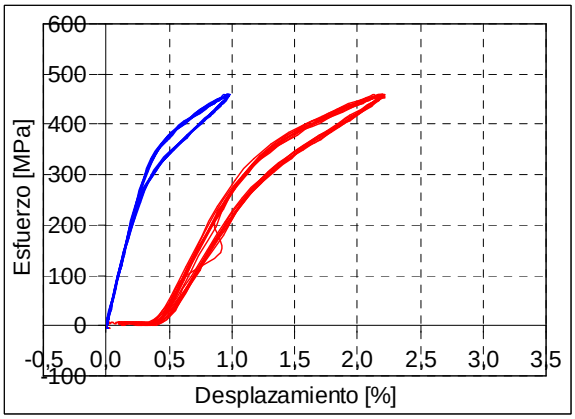


Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A60



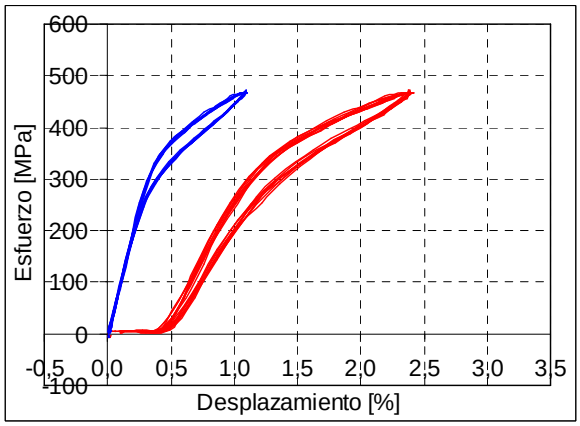
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A61



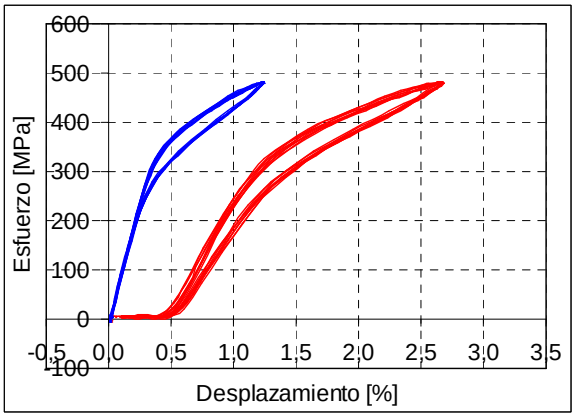
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A62



Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

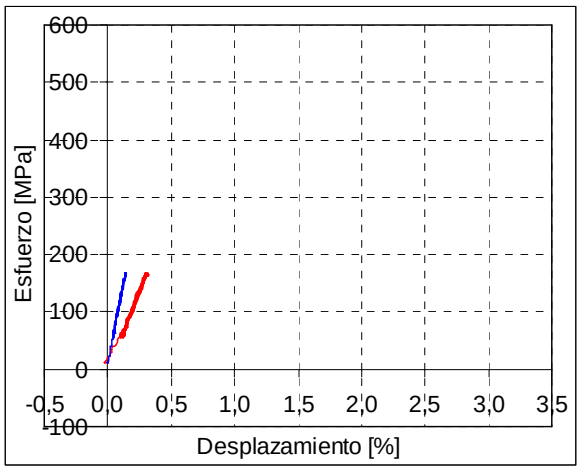
Figura A63



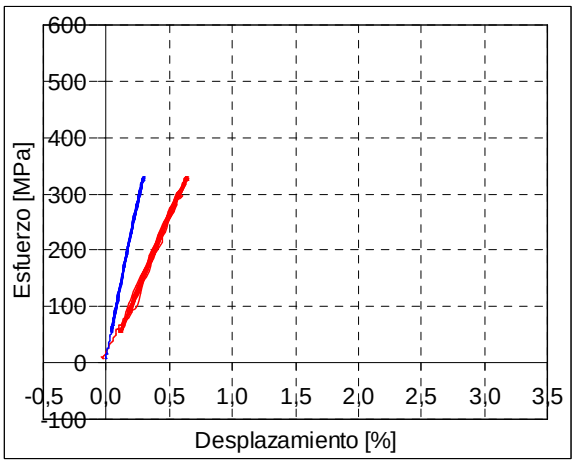
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A64

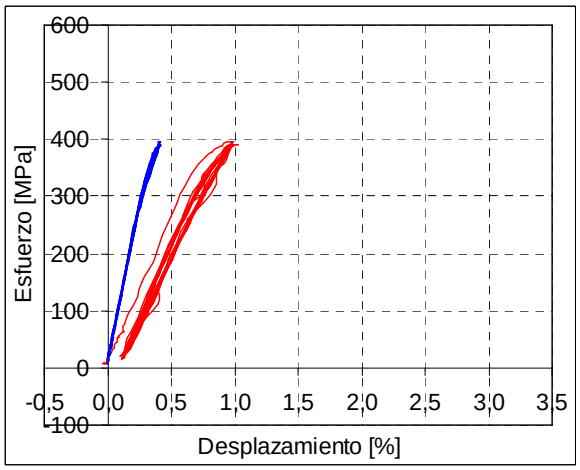
Temperatura de Ensayo: Alta
Tamaño de Grano: Grueso



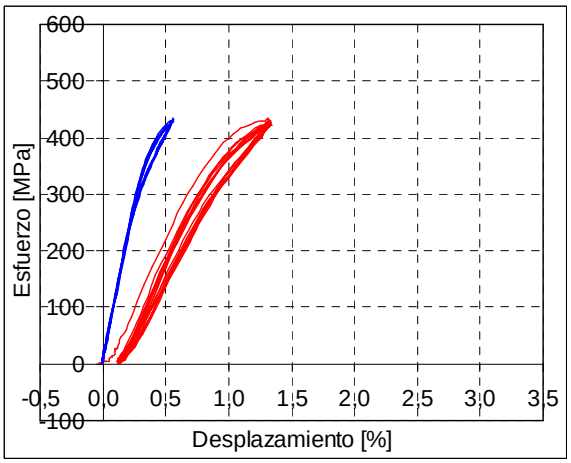
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A65



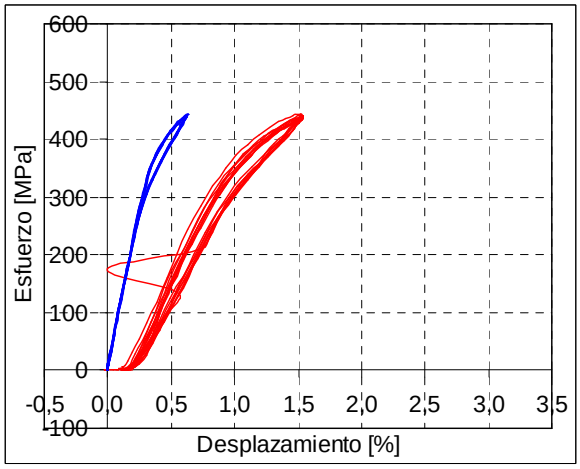
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A66



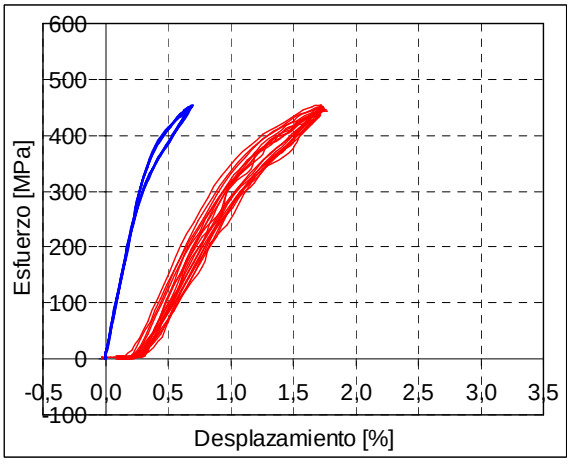
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A67



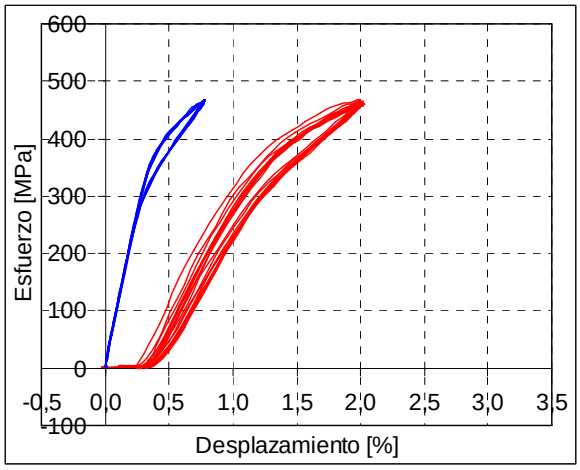
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A68



Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A69

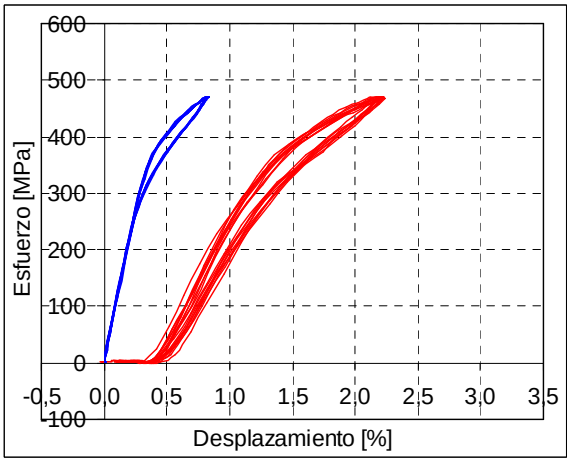


Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:
Figura A70



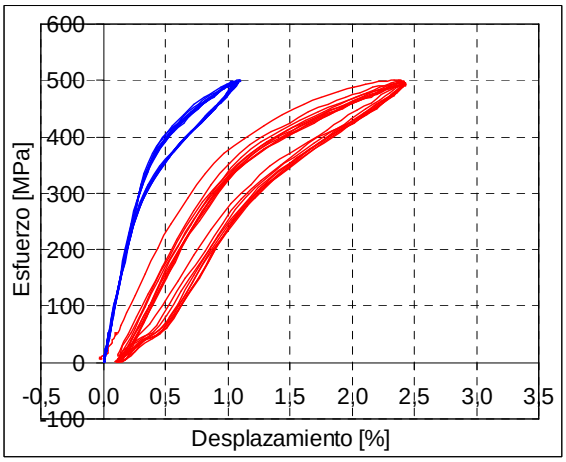
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A71



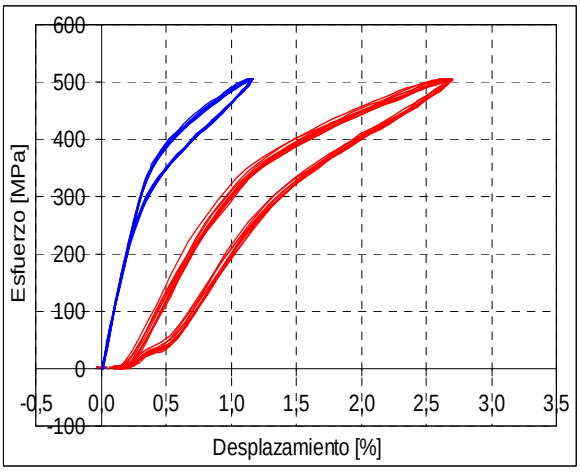
Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A72



Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A73



Deformación Max Nominal:
Deformación Max Real:

Figura A74

Ensayos Cíclicos: Variación de la Frecuencia de Oscilación

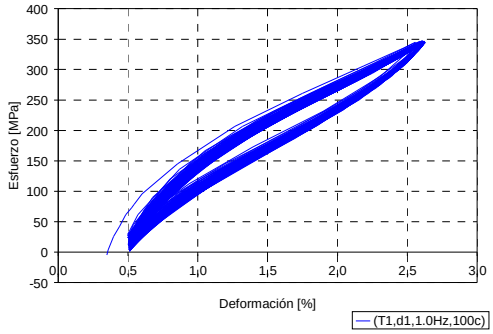


Figura A75

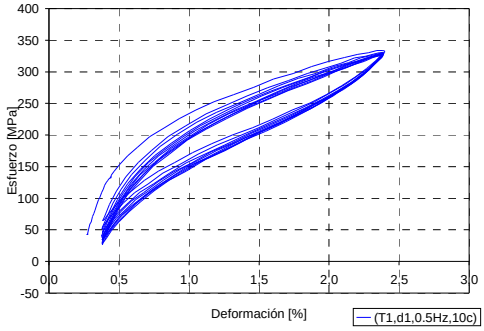


Figura A76

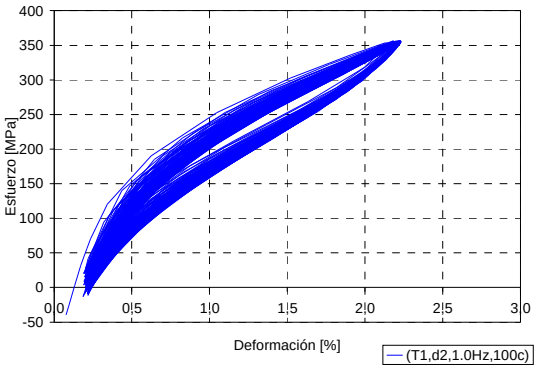


Figura A77

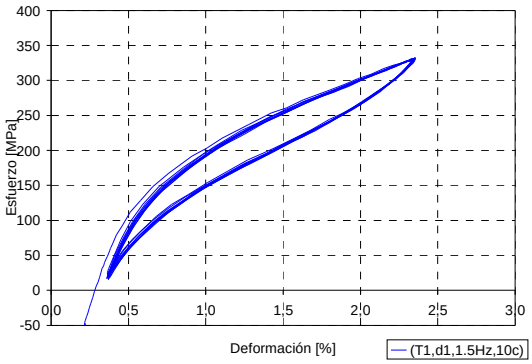


Figura A78

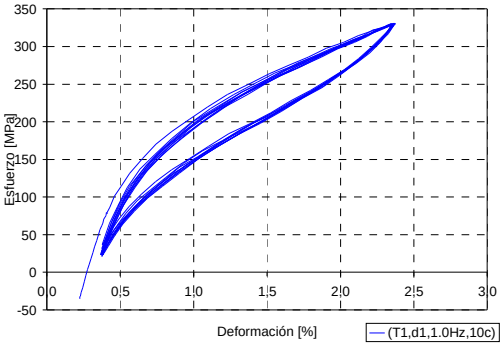


Figura A79

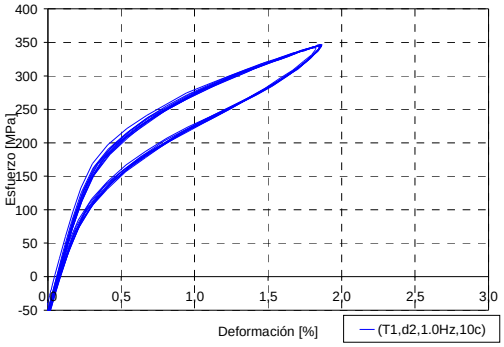


Figura A80

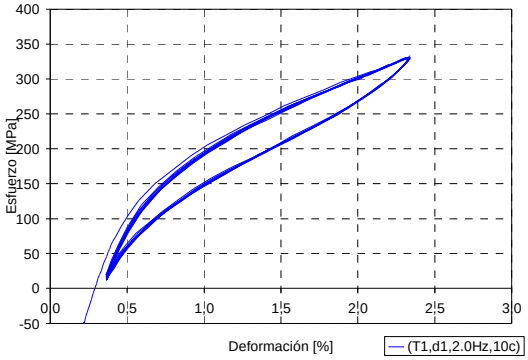


Figura A81

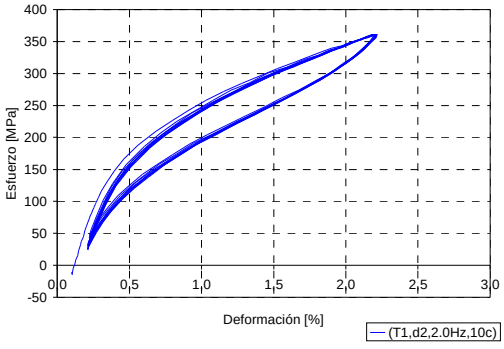


Figura A82

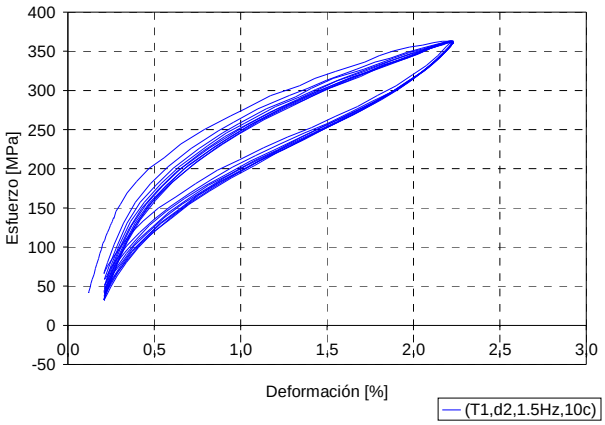


Figura A83

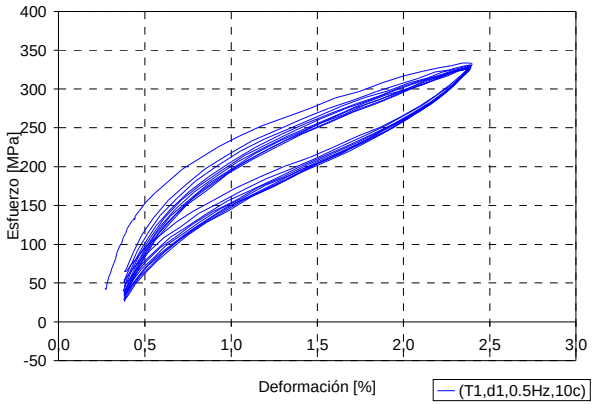


Figura A84

Ensayos Cíclicos: Variación de la Frecuencia de Oscilación en 100 ciclos

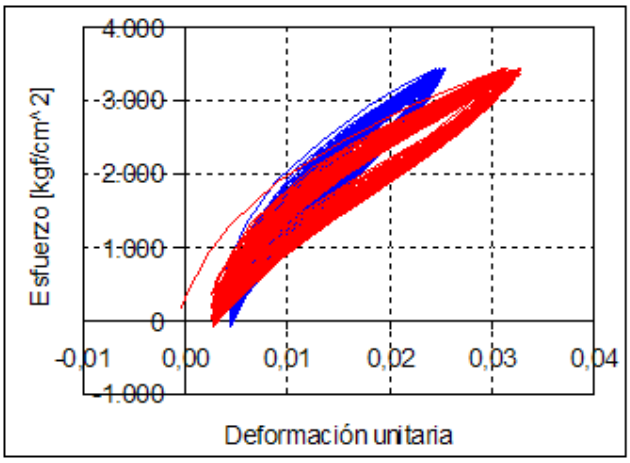


Figura A85

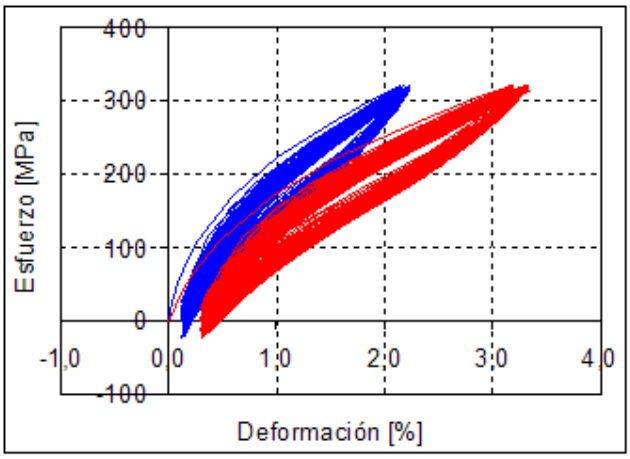


Figura A86

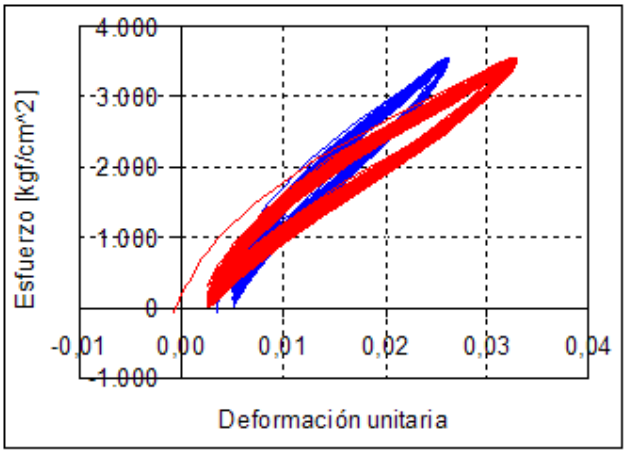


Figura A87

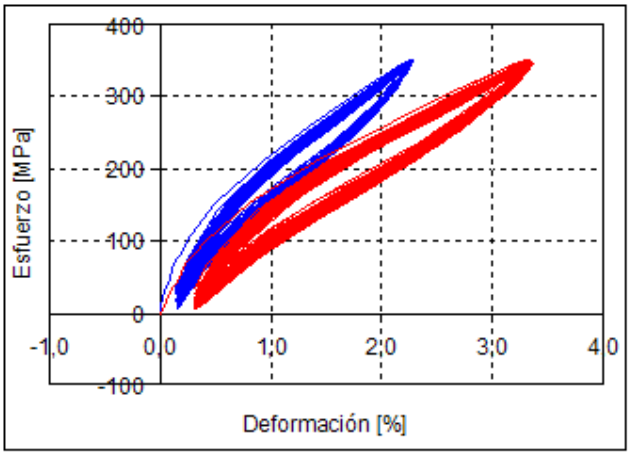


Figura A88

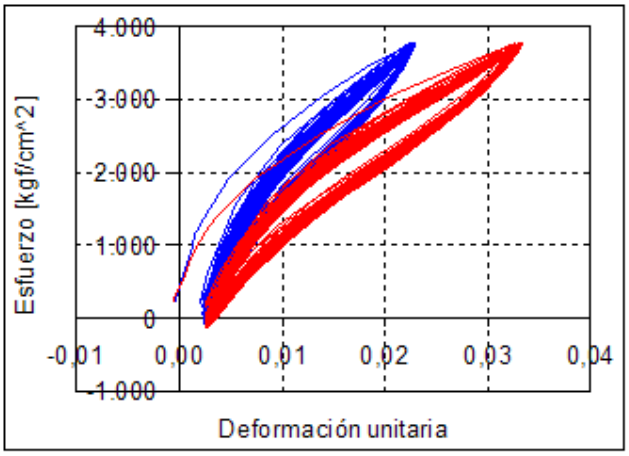


Figura A89

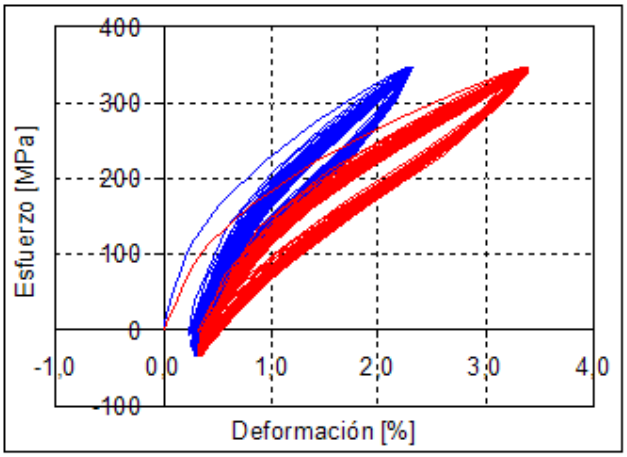


Figura A90

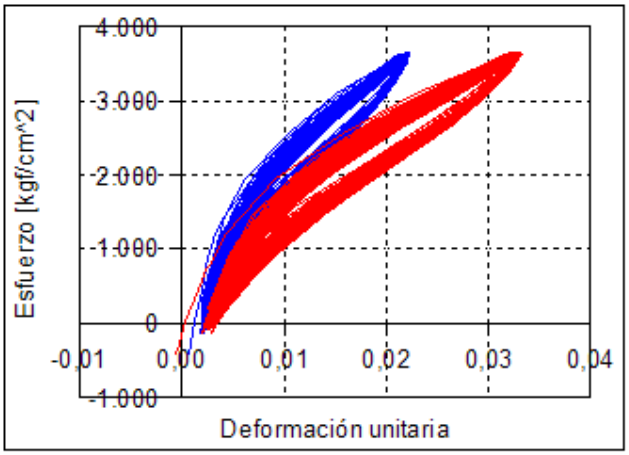


Figura A91

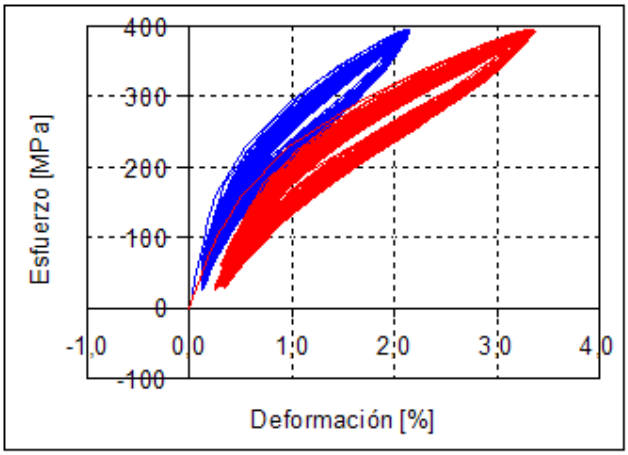


Figura A92

ANEXO B

Programa Utilizado para los Ensayos Cíclicos y Monotónicos

Ensayos Cíclicos:

```
TYP□ □□□ □[C[C□ □□ □□ □□ □TYPE CICLIC.BAS

Missing Subprogram

Ready
T□ □LIST CICLIC.BAS

Syntax Error

Ready
LIST

CICLIC          MTS 773 MU BASIC V02.06A

10 REM *******  ENSAYE DE CARGA CICLICA (POR DEFORMACION) SMA
***********
20 REM
30 SETDIM A(1000,3)
40 PRINT '----------  ANTECEDENTES  DEL  ENSAYE  ----------' \ PRINT
50 PRINT TAB(15)' ****   INSTRUCCIONES  DE  ENSAYE  ***** ' \ PRINT
60 PRINT TAB(22)'CONTROL  MODE  EN  DEFORMACION ?' \ PRINT
70 PRINT  \ PRINT  \ PRINT
80 PRINT
90 PRINT 'L(mm) entre mordazas    = '; \ INPUT L
100 PRINT 'l(mm) extensometro     = '; \ INPUT L2
110 PRINT 'Diametro (mm)          = '; \ INPUT D \ D=D/10
120 PRINT  \ PRINT
130 PRINT 'FRECUENCIA [Hz]          '; \ INPUT F
140 PRINT 'CICLOS                   '; \ INPUT N
150 PRINT 'AMPLITUD MINIMA [%]      '; \ INPUT R1
160 PRINT 'AMPLITUD MAXIMA [%]      '; \ INPUT R2
170 PRINT
180 F8=3.1416/4*D*D
190 E1=50*101.972 \ REM CANAL 1 EN 50KN
200 E2=1.2739 \ REM CANAL 2 EN 20% (IDIEM)
210 E3=10 \ REM CANAL 3 EN 10mm
220 REM
230 PRINT 'SI ESTA LISTO, RETURN   '; \ INPUT R1$
240 IF R1$<>" THEN 230
250 R1=R1/100*L2/E3
260 R2=R2/100*L2/E3
270 T1=1/(45*F) \ REM dT ENTRE LECTURAS PARA 45 PUNTOS/CICLO
280 T8=1/(2*F) \ REM SEMI PERIODO DE ENSAYO
290 FGGO \ CKTIME(1,0,T1) \ ETIME
300 TIMED(1,A,,1,T1/T1,2,3)
```

```
305 ADINIT \ ADGO
310 FOR J=1 TO N
330 FGARB(1,'S', TIME T8,R1)
340 FGARB(1,'S', TIME T8,R2)
350 FGSTATUS(1,T) \ IF T<>0 THEN 350
360 NEXT J
370 FGIMMED(1,'S', TIME T8,0)
375 FGSTOP \ ADSTOP
380 ELEVAR(A)
390 PRINT 'NOMBRE DEL ARCHIVO  ='; \ INPUT A7$
400 OPEN "DU0:"&A7$ FOR OUTPUT AS FILE #1 FILESIZE 400
410 FOR I=1 TO 1000
420 PRINT #1,A(I,3)*E3/L,A(I,2)*E2/L2,A(I,1)*E1/F8
430 IF A(I,1)=0 THEN GO TO 450
440 NEXT I
450 CLOSE #1
460 STOP

Ready
OLD BC

File Not Found

Ready
OLD NC
```

Ensayos Monotónicos:

```
Ready
LIST

NC          MTS 773 MU BASIC V02.06A

10 SETDIM A(1000,3)
20 REM PROGRAMA PARA COMPRESION NO CONFINADA
30 PRINT  \ PRINT
40 PRINT " FONDO DE ESCALA CANAL DE CARGA [KN] = "; \ INPUT E1
45 E2=1.2739
50 PRINT " FONDO DE ESCALA CANAL DEFORMACION mm= "; \ INPUT E3
60 PRINT  \ PRINT
70 DEF FNA(X)=INT(X*1000+.5)/1000
80 KBINT(' ',1, LINE 300 ) \ KBENB
100 Y=E1/2
110 X=E3/2
120 PRINT " SI ESTA LISTO RETURN"
130 INPUT Z$ \ IF Z$<>"" THEN 120
140 FOR I=1 TO 10 \ ADIMMED(1,A) \ ADIMMED(3,C) \ A1=A1+A \ C1=C1+C \
NEXT I
150 A1=A1/10 \ C1=C1/10
160 GOSUB 2000
200 C=1
210 ADIMMED(1,A) \ ADIMMED(2,B) \ ADIMMED(3,D)
```

```
215 A(C,2)=B*E2
220 A(C,1)=(A-A1)*E1 \ A(C,3)=(D-C1)*E3
260 FOR I=1 TO 500 \ NEXT I
270 PLOT(1,A(C,3),A(C,1))
280 C=C+1
290 GO TO 210
300 GOSUB 1000
310 GO TO 100
320 REM
330 REM
1000 VTMODE
1010 PRINT "NOMBRE DEL ARCHIVO"; \ INPUT N0$
1020 OPEN "DU0:"&N0$ FOR OUTPUT AS FILE #1 FILESIZE 400
1030 FOR I=1 TO C-1
1040 PRINT #1,FNA(A(I,3)),FNA(A(I,2)),FNA(A(I,1))
1050 NEXT I
1060 CLOSE
1070 GO TO 80
2000 REM============== EJES ============================
2010 VTMODE \ TEKMODE
2020 SCALE(1,0,0,X,0,Y) \ AXES(1,0,0) \ AXES(1,1000,1000)
2030 LABEL(1,'DEFORMACION mm','FUERZA KN',X/10,Y/10,0)
2040 RETURN

Ready
```

Observaciones:

- Dado el algoritmo del programa, los canales del panel de control manual deben coincidir con los canales ingresados al programa en el momento de realizar los ensayos. De no ser así, los datos obtenidos de los ensayos deben ser corregidos por ponderadores según diferencia de escalas (5, 10, 20, 100)

- El programa de ensayos de Tracción entrega 3 columnas de resultados: en la primera columna el desplazamiento [mm] del vástago de la Máquina Cíclica, en la segunda columna el desplazamiento [mm] según extensómetro y en la tercera columna la carga aplicada [kN].

- El programa de ensayos Cíclicos entrega 3 columnas de resultados: en la primera columna la deformación unitaria $\left[\frac{l_f - l_o}{l_o}\right]$ del vástago de la Máquina Cíclica, en la

segunda columna la deformación unitaria $\left[\frac{l_f - l_o}{l_o}\right]$ según extensómetro y en la tercera columna el esfuerzo aplicado $\left[\frac{kgf}{cm^2}\right]$.

ANEXO C

Planilla usada para los Ensayos Cíclicos y Monotónicos esxperimentales

ETAPA 1

ENSAYOS MONOTÓNICOS

TEMPERATURA [ºC]		NOMBRE PROBETA	CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA	NOMBRE DEL ARCHIVO
Media	Ambiente	GG04	Tamaño de Grano Fino	
		GG05	Tamaño de Grano Medio	
		GG06	Tamaño de Grano Grueso	
Alta	45	GG07	Tamaño de Grano Fino	
		GG08	Tamaño de Grano Medio	
		GG09	Tamaño de Grano Grueso	

ETAPA 2

ENSAYOS CÍCLICOS

Variación de la Amplitud de Deformación

		NOMBRE DEL ARCHIVO
NOMBRE DE LA PROBETA	GG10 GG11 GG12	
AMPLITUD DE DEFORMACIÓN [%]	0,5 – 1,0 – 1,5 – 2,0 – 2,3 – 2,6 – 3,0 – 3,3 – 3,6 – 4,0	
NÚMERO DE CICLOS POR AMPLITUD DE DEFORMACIÓN	10	
FRECUENCIA DE OSCILACIÓN [Hz]	1	
TEMPERATURA DE ENSAYO [ªC]	5	

ANEXO D

Resultados obtenidos del Software MATLAB para el Cálculo de Factores de Amortiguamiento, Energía Disipada, Módulo de Young y Módulo Secante

D.1.- Resultados Disipación de Energía para la Temperatura de Ensayo Media (Ambiente)

La siguiente Tabla muestra el resultado bajo las siguientes Condiciones:

1. Temperatura de Ensayo: Media, 20 [ºC] aproximadamente.
2. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz].
3. Número de ciclos: 10.

D.1.1.- Resultados Disipación de Energía para Tamaño de Grano Fino

Tabla D1

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 0,5 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	0,408	0,187	0,204	0,123	10,456	9,560	19,121	0,641	296,761	497,725
2	0,897	0,448	0,449	0,286	10,162	10,151	20,302	1,410	291,087	502,522
3	0,642	0,331	0,321	0,205	9,875	10,165	20,329	1,009	291,113	493,315
4	0,542	0,279	0,271	0,165	9,427	9,707	19,413	0,852	285,246	490,221
5	0,599	0,319	0,300	0,188	9,398	10,000	19,999	0,941	289,478	510,136
6	0,839	0,454	0,419	0,259	9,055	9,814	19,628	1,317	286,917	510,939
7	1,053	0,609	0,527	0,338	8,816	10,202	20,403	1,655	282,586	500,035
8	0,846	0,467	0,423	0,261	8,894	9,829	19,657	1,329	280,834	501,414
PROMEDIO	**0,728**	**0,387**	**0,364**	**0,228**	**9,510**	**9,928**	**19,857**	**1,144**	**288,003**	**500,788**

Tabla D2

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 1,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	2,466	1,126	1,233	4,340	61,322	56,020	112,040	3,874	316,959	422,435
2	2,380	1,160	1,190	4,205	57,712	56,242	112,485	3,738	314,269	424,111
3	2,053	0,986	1,026	3,578	57,748	55,476	110,953	3,225	318,994	436,794
4	2,256	1,113	1,128	3,979	56,918	56,136	112,272	3,544	318,527	435,053
5	2,230	1,094	1,115	3,848	55,973	54,932	109,863	3,502	317,055	434,227
6	2,075	1,022	1,038	3,617	56,354	55,473	110,945	3,260	318,464	440,251
7	1,924	0,982	0,962	3,399	55,110	56,244	112,488	3,022	318,464	437,613
8	1,918	0,999	0,959	3,349	53,342	55,583	111,166	3,013	320,362	439,376
PROMEDIO	**2,163**	**1,060**	**1,081**	**3,789**	**56,810**	**55,763**	**111,526**	**3,397**	**317,887**	**433,732**

Tabla D3

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 1,5 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	3,913	1,506	1,956	15,523	164,087	126,290	252,579	6,146	251,295	309,758
2	3,973	1,635	1,987	16,078	156,500	128,807	257,614	6,241	251,576	313,152
3	3,563	1,395	1,782	14,454	164,861	129,124	258,247	5,597	250,026	310,489
4	3,961	1,560	1,980	15,051	153,581	120,962	241,923	6,221	250,026	309,580
5	3,586	1,447	1,793	14,004	154,057	124,295	248,590	5,634	255,300	316,676
6	3,517	1,488	1,759	13,774	147,300	124,645	249,290	5,525	255,300	311,911
7	3,483	1,443	1,742	13,266	146,355	121,241	242,482	5,471	257,309	316,711
8	3,485	1,433	1,743	13,505	150,032	123,353	246,706	5,474	257,325	317,134
PROMEDIO	**3,685**	**1,488**	**1,843**	**14,457**	**154,597**	**124,839**	**249,679**	**5,789**	**253,519**	**313,176**

Tabla D4

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	7,693	2,515	3,847	40,491	256,234	167,528	335,055	12,085	133,572	151,529
2	7,742	3,002	3,871	42,718	226,449	175,645	351,291	12,160	133,572	156,965
3	6,712	2,816	3,356	39,891	225,442	189,175	378,350	10,543	138,046	178,473
4	6,081	2,638	3,041	40,028	241,535	209,515	419,030	9,553	135,144	177,608
5	6,075	3,251	3,037	40,807	199,773	213,825	427,649	9,542	134,640	178,462
6	5,570	2,668	2,785	35,205	210,048	201,172	402,345	8,750	142,514	195,659
7	5,242	2,446	2,621	37,307	242,751	226,536	453,072	8,234	134,360	182,412
8	6,761	3,004	3,381	40,901	216,716	192,559	385,117	10,620	134,360	170,708
PROMEDIO	**6,485**	**2,792**	**3,242**	**39,668**	**227,368**	**196,994**	**393,989**	**10,186**	**135,776**	**173,977**

Tabla D5

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,3 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	5,702	1,932	2,851	44,661	367,930	249,338	498,675	8,956	159,629	185,183
2	5,495	1,974	2,747	44,222	356,589	256,180	512,359	8,631	159,823	189,571
3	5,337	1,937	2,669	42,797	351,656	255,237	510,473	8,384	162,659	194,511
4	5,192	1,884	2,596	41,768	352,847	256,064	512,128	8,156	163,341	197,083
5	5,256	1,865	2,628	42,078	359,085	254,852	509,704	8,255	161,646	193,739
6	5,441	1,988	2,721	42,993	344,260	251,505	503,010	8,547	161,646	193,094
7	4,949	1,973	2,474	40,249	324,698	258,899	517,799	7,773	163,763	200,258
8	4,852	1,877	2,426	38,590	327,225	253,165	506,329	7,622	168,128	206,995
PROMEDIO	**5,278**	**1,929**	**2,639**	**42,170**	**348,036**	**254,405**	**508,810**	**8,290**	**162,579**	**195,054**

Tabla D6

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,6 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	6,115	2,015	3,058	59,426	469,329	309,322	618,644	9,606	140,925	164,037
2	5,949	2,122	2,974	60,053	450,440	321,331	642,662	9,344	140,555	167,461
3	5,864	2,086	2,932	58,141	443,626	315,599	631,198	9,211	142,561	171,402
4	5,517	1,989	2,759	54,989	440,093	317,251	634,502	8,666	143,631	174,109
5	5,591	1,999	2,796	55,841	444,612	317,916	635,832	8,782	143,000	173,745
6	5,622	1,979	2,811	56,121	451,413	317,737	635,473	8,831	141,384	170,248
7	5,847	2,026	2,923	57,511	451,834	313,099	626,199	9,184	141,139	169,162
8	5,607	2,003	2,804	55,971	444,778	317,737	635,473	8,808	141,139	170,248
PROMEDIO	**5,764**	**2,027**	**2,882**	**57,256**	**449,515**	**316,249**	**632,498**	**9,054**	**141,792**	**170,052**

Tabla D7

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	14,981	5,540	7,491	198,211	569,429	421,147	842,294	23,532	126,619	156,087
2	6,296	2,125	3,148	75,801	567,756	383,217	766,434	9,890	126,151	150,190
3	6,365	2,183	3,183	77,318	563,771	386,655	773,310	9,998	126,151	151,136
4	6,132	2,137	3,066	74,675	556,243	387,631	775,262	9,632	126,385	151,518
5	6,114	2,145	3,057	74,749	554,578	389,179	778,358	9,603	126,853	153,205
6	6,190	2,178	3,095	75,737	553,470	389,460	778,921	9,723	126,948	153,861
7	5,986	2,135	2,993	73,675	549,313	391,750	783,500	9,403	126,627	154,491
8	5,886	2,113	2,943	72,796	548,246	393,695	787,389	9,245	127,089	155,258
PROMEDIO	**7,244**	**2,569**	**3,622**	**90,370**	**557,851**	**392,842**	**785,683**	**11,379**	**126,603**	**153,218**

Tabla D8

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,3 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	7,011	2,364	3,506	93,638	630,560	425,106	850,213	11,014	109,400	129,900
2	7,018	2,428	3,509	94,881	621,938	430,362	860,725	11,023	109,400	131,000
3	6,887	2,448	3,444	94,533	614,576	436,910	873,820	10,818	109,900	133,800
4	6,696	2,443	3,348	92,724	604,130	440,805	881,610	10,518	110,200	135,300
5	6,537	2,413	3,268	90,996	600,111	443,121	886,242	10,268	110,800	137,300
6	6,383	2,355	3,192	89,080	601,957	444,218	888,435	10,027	110,800	137,600
7	6,554	2,384	3,277	90,519	604,336	439,658	879,315	10,294	110,500	136,300
8	6,468	2,364	3,234	89,545	602,855	440,696	881,392	10,159	110,300	136,000
PROMEDIO	**6,694**	**2,400**	**3,347**	**91,990**	**610,058**	**437,609**	**875,219**	**10,515**	**110,163**	**134,650**

Tabla D9

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,6 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	14,500	5,400	7,300	243,900	714,800	533,900	1067,800	22,800	108,466	135,132
2	6,500	2,200	3,300	101,200	718,000	492,400	984,800	10,300	107,687	129,090
3	6,600	2,300	3,300	103,800	715,500	498,800	997,600	10,400	107,623	129,917
4	6,600	2,300	3,300	102,600	711,400	497,500	995,000	10,300	107,623	130,246
5	6,500	2,300	3,300	103,400	712,300	503,700	1007,500	10,300	107,366	131,115
6	6,600	2,300	3,300	103,900	712,600	502,900	1005,800	10,300	107,143	130,710
7	6,500	2,300	3,300	102,800	709,400	502,400	1004,700	10,200	107,143	130,851
8	6,600	2,300	3,300	103,800	706,300	502,700	1005,500	10,300	107,143	130,757
PROMEDIO	**7,550**	**2,675**	**3,800**	**120,675**	**712,538**	**504,288**	**1008,588**	**11,863**	**107,524**	**130,977**

Tabla D10

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 4,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	6,600	2,300	3,300	121,000	843,600	580,400	1160,800	10,400	104,132	124,298
2	6,700	2,300	3,400	123,200	836,900	582,100	1164,200	10,600	103,428	124,499
3	6,600	2,300	3,300	121,200	828,600	580,400	1160,800	10,400	103,569	124,298
4	6,600	2,300	3,300	120,700	822,500	580,200	1160,400	10,400	103,794	124,908
5	6,500	2,300	3,300	118,100	816,200	578,300	1156,700	10,200	104,078	124,747
6	6,500	2,300	3,300	118,000	813,700	577,000	1154,000	10,200	104,278	125,035
7	6,500	2,300	3,200	117,300	812,500	576,400	1152,900	10,200	104,278	125,158
8	6,500	2,300	3,200	117,200	809,800	574,700	1149,500	10,200	104,278	124,956
PROMEDIO	**6,563**	**2,300**	**3,288**	**119,588**	**822,975**	**578,688**	**1157,413**	**10,325**	**103,979**	**124,737**

D.1.2.- Resultados Disipación de Energía para Tamaño de Grano Medio

Tabla D11

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 0,5 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía Disipada	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular		Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	0,034	0,006	0,017	0,010	25,396	9,011	18,022	0,053	827,926	646,186
2	0,043	0,008	0,021	0,013	24,798	9,338	18,675	0,067	827,926	653,864
3	0,176	0,033	0,088	0,048	23,453	8,722	17,445	0,277	820,500	625,509
4	0,075	0,015	0,038	0,023	24,636	9,522	19,044	0,118	837,810	651,269
5	0,221	0,041	0,111	0,062	23,913	8,939	17,877	0,348	834,165	641,018
6	0,126	0,024	0,063	0,037	24,525	9,393	18,786	0,198	834,165	650,018
7	0,007	0,001	0,004	0,002	25,307	9,411	18,821	0,011	827,926	658,976
8	0,351	0,065	0,175	0,099	24,426	9,011	18,022	0,551	827,926	646,186
PROMEDIO	**0,129**	**0,024**	**0,065**	**0,037**	**24,557**	**9,168**	**18,336**	**0,203**	**829,793**	**646,628**

Tabla D12

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 1,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía Disipada	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular		Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	7,382	3,574	3,691	24,611	109,601	106,125	212,249	11,595	571,376	607,675
2	2,975	0,767	1,488	5,405	112,159	57,825	115,651	4,673	566,256	466,325
3	3,098	0,813	1,549	5,628	110,160	57,825	115,651	4,866	566,256	466,325
4	2,803	0,768	1,402	5,256	108,915	59,687	119,375	4,403	571,882	475,595
5	2,825	0,775	1,413	5,208	106,926	58,685	117,370	4,438	572,376	473,259
6	2,736	0,754	1,368	4,945	104,454	57,531	115,062	4,298	579,283	479,225
7	2,680	0,731	1,340	4,857	105,708	57,690	115,381	4,210	583,622	488,496
8	2,766	0,764	1,383	5,113	106,505	58,828	117,655	4,345	584,144	486,049
PROMEDIO	**3,408**	**1,118**	**1,704**	**7,628**	**108,054**	**64,275**	**128,549**	**5,354**	**574,399**	**492,869**

Tabla D13

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 1,5 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía Disipada	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular		Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	4,584	1,289	2,292	19,566	241,514	135,854	271,707	7,201	388,768	330,283
2	4,570	1,312	2,285	19,372	234,966	134,922	269,845	7,179	386,389	328,744
3	4,504	1,266	2,252	19,035	239,273	134,532	269,063	7,074	386,291	327,791
4	4,507	1,312	2,254	19,440	235,856	137,297	274,595	7,080	386,291	328,700
5	4,538	1,304	2,269	19,151	233,664	134,326	268,653	7,129	387,685	330,201
6	4,391	1,328	2,196	19,065	228,468	138,203	276,406	6,897	389,819	335,995
7	4,203	1,300	2,102	18,468	226,040	139,856	279,712	6,603	396,288	345,323
8	4,219	1,303	2,109	18,453	225,354	139,234	278,469	6,627	396,946	346,865
PROMEDIO	**4,440**	**1,302**	**2,220**	**19,069**	**233,142**	**136,778**	**273,556**	**6,974**	**389,810**	**334,238**

Tabla D14

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	5,140	1,533	2,570	36,709	381,210	227,344	454,687	8,073	292,146	257,045
2	4,901	1,505	2,451	35,739	377,937	232,110	464,221	7,699	292,849	262,041
3	5,013	1,544	2,507	36,390	375,184	231,064	462,128	7,874	294,204	263,227
4	4,894	1,530	2,447	35,936	373,727	233,748	467,495	7,687	295,342	266,687
5	4,803	1,508	2,402	35,193	371,517	233,218	466,436	7,545	296,259	267,292
6	4,795	1,525	2,398	35,418	369,555	235,107	470,213	7,532	296,720	269,049
7	4,692	1,501	2,346	34,523	366,054	234,217	468,435	7,370	297,437	270,071
8	4,654	1,485	2,327	34,320	367,930	234,755	469,511	7,310	297,902	269,462
PROMEDIO	**4,861**	**1,516**	**2,431**	**35,529**	**372,889**	**232,695**	**465,391**	**7,636**	**295,357**	**265,609**

Tabla D15

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,3 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	5,076	1,601	2,538	46,957	466,808	294,443	588,887	7,974	257,419	236,193
2	5,039	1,625	2,519	47,049	460,851	297,238	594,477	7,914	256,856	237,232
3	4,972	1,614	2,486	46,499	458,672	297,663	595,326	7,811	257,349	239,079
4	4,792	1,582	2,396	45,251	455,150	300,578	601,155	7,527	257,687	241,114
5	4,863	1,634	2,432	46,339	451,378	303,304	606,608	7,639	258,708	243,301
6	4,772	1,597	2,386	45,235	450,741	301,767	603,534	7,495	260,600	244,540
7	4,757	1,604	2,379	45,097	447,382	301,767	603,534	7,472	260,600	244,540
8	4,680	1,601	2,340	44,707	444,405	304,092	608,184	7,351	261,469	247,052
PROMEDIO	**4,869**	**1,607**	**2,434**	**45,892**	**454,423**	**300,106**	**600,213**	**7,648**	**258,836**	**241,631**

Tabla D16

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,6 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	5,171	1,726	2,585	59,215	546,015	364,523	729,047	8,122	231,632	220,096
2	5,110	1,742	2,555	59,185	540,695	368,677	737,353	8,027	231,632	221,386
3	4,988	1,702	2,494	57,272	535,494	365,510	731,020	7,835	231,341	220,450
4	5,018	1,712	2,509	57,403	533,539	364,123	728,245	7,882	232,679	220,338
5	4,944	1,691	2,472	56,397	530,884	363,121	726,243	7,766	233,354	220,946
6	4,979	1,713	2,489	56,675	526,462	362,339	724,678	7,821	233,761	220,470
7	4,900	1,685	2,450	55,709	526,324	361,920	723,839	7,696	235,127	221,680
8	5,015	1,722	2,508	56,592	523,049	359,182	718,363	7,878	235,127	220,490
PROMEDIO	**5,016**	**1,712**	**2,508**	**57,306**	**532,808**	**363,674**	**727,348**	**7,878**	**233,081**	**220,732**

Tabla D17

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	5,393	1,817	2,697	74,841	655,666	441,738	883,475	8,471	204,680	194,366
2	5,446	1,842	2,723	75,801	655,026	443,074	886,148	8,554	204,479	194,589
3	5,431	1,843	2,716	75,216	649,658	440,818	881,635	8,531	204,479	193,961
4	5,465	1,856	2,733	75,471	647,273	439,576	879,152	8,585	205,062	194,508
5	5,276	1,811	2,638	72,868	640,438	439,666	879,331	8,287	205,998	195,282
6	5,417	1,837	2,709	74,111	641,975	435,476	870,953	8,509	206,919	194,704
7	5,416	1,835	2,708	73,874	640,648	434,153	868,306	8,508	206,919	194,479
8	5,381	1,822	2,691	73,160	639,108	432,738	865,475	8,453	206,490	193,479
PROMEDIO	**5,403**	**1,833**	**2,702**	**74,418**	**646,224**	**438,405**	**876,809**	**8,487**	**205,628**	**194,421**

Tabla D18

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,3 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	5,472	1,827	2,736	84,213	733,788	489,919	979,837	8,595	188,764	178,184
2	5,602	1,893	2,801	86,684	728,825	492,535	985,070	8,800	188,764	179,441
3	5,678	1,925	2,839	87,846	726,473	492,493	984,985	8,919	189,187	180,194
4	5,667	1,910	2,834	86,958	724,571	488,418	976,836	8,902	189,356	179,470
5	5,549	1,876	2,774	84,962	720,767	487,412	974,823	8,716	189,356	179,100
6	5,560	1,898	2,780	85,907	720,537	491,814	983,628	8,734	189,356	181,184
7	5,522	1,896	2,761	85,845	720,782	494,831	989,663	8,674	190,345	182,295
8	5,637	1,926	2,819	86,206	712,370	486,785	973,570	8,855	189,187	179,331
PROMEDIO	**5,586**	**1,894**	**2,793**	**86,078**	**723,514**	**490,526**	**981,052**	**8,774**	**189,289**	**179,900**

Tabla D19

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,6 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	5,700	1,900	2,800	99,000	817,800	554,700	1109,400	8,900	175,033	168,623
2	6,000	2,000	3,000	102,800	815,400	549,200	1098,300	9,400	174,821	166,940
3	5,900	2,000	3,000	102,200	814,000	550,000	1100,000	9,300	174,469	166,680
4	6,000	2,000	3,000	104,100	808,600	553,800	1107,600	9,400	174,469	168,221
5	5,800	2,000	2,900	101,200	805,400	552,800	1105,500	9,200	175,174	169,217
6	5,900	2,000	3,000	100,400	801,200	540,700	1081,300	9,300	174,825	166,164
7	5,900	2,000	3,000	99,600	792,900	536,300	1072,600	9,300	174,130	165,473
8	5,700	1,900	2,800	96,800	794,200	543,600	1087,200	8,900	175,535	168,649
PROMEDIO	**5,863**	**1,975**	**2,938**	**100,763**	**806,188**	**547,638**	**1095,238**	**9,213**	**174,807**	**167,496**

Tabla D20

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 4,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	6,200	2,100	3,100	123,000	933,500	632,500	1265,000	9,700	158,933	154,442
2	6,200	2,100	3,100	124,300	930,300	634,200	1268,400	9,800	158,535	154,636
3	6,300	2,100	3,200	125,100	927,800	627,400	1254,700	10,000	158,535	153,289
4	6,400	2,200	3,200	125,400	924,900	620,800	1241,500	10,100	158,479	151,887
5	6,300	2,100	3,100	122,400	921,400	622,000	1244,000	9,800	158,366	152,189
6	6,200	2,100	3,100	122,900	914,300	627,300	1254,600	9,800	158,366	153,914
7	6,200	2,100	3,100	122,200	913,700	623,500	1247,000	9,800	158,649	153,632
8	6,400	2,200	3,200	122,600	906,900	614,500	1228,900	10,000	158,649	151,617
PROMEDIO	**6,275**	**2,125**	**3,138**	**123,488**	**921,600**	**625,275**	**1250,513**	**9,875**	**158,564**	**153,201**

D.1.3.- Resultados Disipación de Energía para Tamaño de Grano Grueso

Tabla D21

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 0,5 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	2,234	0,387	1,117	0,588	24,144	8,374	16,748	3,509	842,665	654,213
2	1,771	0,128	0,886	0,198	24,562	3,559	7,117	2,783	842,665	670,854
3	1,894	0,129	0,947	0,199	24,544	3,351	6,703	2,976	839,442	657,050
4	1,842	0,128	0,921	0,204	25,342	3,523	7,047	2,893	840,579	664,214
5	31,831	0,015	15,916	0,001	1,094	0,001	0,002	50,000	834,323	228,000
6	2,197	0,156	1,098	0,241	24,513	3,484	6,968	3,451	834,323	632,019
7	1,428	0,097	0,714	0,149	24,478	3,317	6,634	2,243	839,442	650,277
8	1,576	0,116	0,788	0,175	24,047	3,523	7,047	2,476	839,442	664,223
PROMEDIO	**5,597**	**0,145**	**2,798**	**0,219**	**21,591**	**3,642**	**7,283**	**8,791**	**839,110**	**602,606**

Tabla D22

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 1,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	3,670	0,487	1,835	2,341	76,468	20,304	40,608	5,765	688,344	503,475
2	3,288	0,441	1,644	2,175	78,596	21,058	42,116	5,165	695,361	518,512
3	3,457	0,485	1,728	2,346	77,052	21,599	43,197	5,430	695,361	524,432
4	3,092	0,440	1,546	2,191	79,210	22,551	45,102	4,857	696,894	525,369
5	3,236	0,443	1,618	2,141	76,913	21,058	42,116	5,084	696,894	518,512
6	3,028	0,424	1,514	2,047	76,893	21,523	43,047	4,756	699,825	526,269
7	3,105	0,424	1,552	2,018	75,839	20,689	41,377	4,877	702,753	527,771
8	2,950	0,401	1,475	1,911	75,753	20,615	41,229	4,634	699,920	529,660
PROMEDIO	**3,228**	**0,443**	**1,614**	**2,146**	**77,090**	**21,175**	**42,349**	**5,071**	**696,919**	**521,750**

Tabla D23

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 1,5 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	4,168	0,713	2,084	6,323	141,115	48,290	96,580	6,547	587,921	439,079
2	3,841	0,670	1,921	5,968	141,773	49,454	98,907	6,034	587,921	440,222
3	3,748	0,661	1,874	5,823	140,313	49,454	98,907	5,887	587,921	440,222
4	3,676	0,642	1,838	5,699	141,242	49,349	98,699	5,774	587,921	441,152
5	3,658	0,640	1,829	5,672	141,083	49,349	98,699	5,746	587,921	441,152
6	3,738	0,653	1,869	5,819	141,737	49,558	99,116	5,871	587,921	439,295
7	3,580	0,637	1,790	5,671	141,716	50,426	100,853	5,623	591,093	448,880
8	3,517	0,629	1,758	5,559	140,561	50,313	100,627	5,524	587,921	444,120
PROMEDIO	**3,741**	**0,656**	**1,870**	**5,817**	**141,192**	**49,524**	**99,048**	**5,876**	**588,318**	**441,765**

Tabla D24

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	4,336	0,843	2,168	11,530	217,623	84,648	169,297	6,811	506,317	380,537
2	4,095	0,819	2,047	11,118	215,947	86,432	172,865	6,432	503,847	382,796
3	3,863	0,781	1,932	10,661	217,317	87,842	175,685	6,068	505,673	386,736
4	3,960	0,801	1,980	10,867	216,056	87,352	174,703	6,221	508,151	386,868
5	3,955	0,803	1,977	10,906	216,055	87,779	175,559	6,212	509,381	391,087
6	3,729	0,761	1,864	10,259	214,625	87,582	175,164	5,857	506,897	387,887
7	3,849	0,789	1,925	10,687	215,471	88,369	176,739	6,047	508,745	392,543
8	3,798	0,782	1,899	10,560	214,810	88,501	177,002	5,966	508,745	391,958
PROMEDIO	**3,948**	**0,797**	**1,974**	**10,824**	**215,988**	**87,313**	**174,627**	**6,202**	**507,219**	**387,551**

Tabla D25

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,3 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	8,316	1,295	4,158	24,639	302,857	94,310	188,620	13,063	421,204	268,597
2	5,138	0,837	2,569	16,650	316,562	103,146	206,292	8,071	420,775	287,551
3	5,105	0,834	2,553	16,602	316,979	103,511	207,023	8,020	418,877	286,537
4	4,989	0,824	2,495	16,427	317,163	104,798	209,595	7,837	418,500	289,416
5	4,854	0,803	2,427	15,848	314,167	103,924	207,848	7,625	416,651	287,004
6	4,718	0,793	2,359	15,786	316,836	106,503	213,005	7,411	419,116	292,747
7	4,734	0,782	2,367	15,587	317,171	104,798	209,595	7,437	417,237	289,416
8	4,733	0,798	2,366	15,792	314,837	106,211	212,422	7,434	417,237	291,945
PROMEDIO	**5,324**	**0,871**	**2,662**	**17,166**	**314,571**	**103,400**	**206,800**	**8,362**	**418,700**	**286,651**

Tabla D26

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,6 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	4,643	0,809	2,322	18,644	366,647	127,813	255,626	7,294	395,221	275,647
2	4,753	0,830	2,376	19,272	369,563	129,075	258,149	7,465	393,510	274,364
3	4,807	0,840	2,403	19,470	368,732	128,941	257,883	7,550	393,187	274,647
4	4,799	0,861	2,400	19,721	364,454	130,805	261,611	7,538	393,187	276,331
5	4,667	0,830	2,333	18,912	362,528	128,997	257,994	7,330	394,503	278,779
6	4,609	0,819	2,304	18,658	362,730	128,863	257,726	7,240	395,158	279,069
7	4,514	0,810	2,257	18,538	364,093	130,719	261,439	7,091	396,203	280,747
8	4,506	0,809	2,253	18,465	363,405	130,449	260,897	7,077	396,203	281,330
PROMEDIO	**4,662**	**0,826**	**2,331**	**18,960**	**365,269**	**129,458**	**258,916**	**7,323**	**394,647**	**277,614**

Tabla D27

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	4,797	0,882	2,398	24,486	442,023	162,495	324,990	7,534	364,377	257,697
2	4,778	0,892	2,389	24,686	440,714	164,470	328,940	7,505	364,377	259,441
3	4,876	0,907	2,438	25,055	439,559	163,554	327,107	7,660	363,139	258,455
4	4,798	0,905	2,399	24,862	437,077	164,946	329,892	7,537	363,672	261,119
5	4,706	0,886	2,353	24,343	437,201	164,652	329,305	7,392	365,012	261,585
6	4,605	0,875	2,302	23,985	436,330	165,804	331,608	7,233	365,012	263,414
7	4,689	0,886	2,345	24,212	435,000	164,359	328,718	7,366	365,012	262,052
8	4,549	0,865	2,274	23,694	436,143	165,804	331,608	7,145	365,012	263,414
PROMEDIO	**4,725**	**0,887**	**2,362**	**24,415**	**438,006**	**164,510**	**329,021**	**7,421**	**364,451**	**260,897**

Tabla D28

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,3 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	4,779	0,916	2,389	28,369	492,729	188,955	377,911	7,507	346,047	248,578
2	4,914	0,946	2,457	29,236	491,738	189,377	378,754	7,719	346,047	249,133
3	4,704	0,924	2,352	28,537	491,595	193,109	386,219	7,389	346,047	251,995
4	4,768	0,930	2,384	28,713	491,647	191,684	383,369	7,490	345,575	250,540
5	4,777	0,938	2,388	29,097	493,589	193,890	387,780	7,504	345,796	250,982
6	4,755	0,930	2,377	28,874	493,997	193,309	386,617	7,468	345,326	250,633
7	4,865	0,956	2,433	29,701	494,502	194,315	388,630	7,643	345,556	251,533
8	4,737	0,930	2,369	28,855	493,718	193,890	387,780	7,441	345,092	250,982
PROMEDIO	**4,787**	**0,934**	**2,394**	**28,923**	**492,939**	**192,316**	**384,632**	**7,520**	**345,686**	**250,547**

Tabla D29

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,6[%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	4,791	0,955	2,395	32,587	543,215	216,516	433,032	7,525	330,911	240,803
2	4,777	0,975	2,389	33,624	549,033	224,040	448,079	7,504	330,112	243,689
3	4,808	1,013	2,404	34,469	541,695	228,195	456,391	7,552	328,373	244,230
4	4,810	1,010	2,405	34,359	541,643	227,373	454,747	7,556	331,960	249,149
5	4,626	0,974	2,313	33,331	544,924	229,353	458,706	7,266	330,911	248,003
6	4,648	0,958	2,324	32,875	545,922	225,134	450,268	7,301	329,436	244,518
7	4,732	0,974	2,366	33,445	546,689	225,001	450,002	7,432	329,017	243,655
8	4,571	0,974	2,286	32,718	534,480	227,827	455,653	7,181	329,017	245,629
PROMEDIO	**4,720**	**0,979**	**2,360**	**33,426**	**543,450**	**225,430**	**450,860**	**7,415**	**329,967**	**244,960**

Tabla D30

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 4,0[%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	5,002	1,031	2,501	40,614	627,172	258,438	516,876	7,858	307,944	227,292
2	4,998	1,049	2,499	41,310	626,543	263,092	526,183	7,851	307,409	229,554
3	5,065	1,067	2,533	42,029	626,650	264,132	528,263	7,956	307,409	229,551
4	4,996	1,061	2,498	41,758	626,144	266,039	532,078	7,848	307,409	230,600
5	4,935	1,059	2,468	41,651	625,730	268,648	537,295	7,752	307,409	231,944
6	5,005	1,074	2,502	42,240	625,906	268,648	537,295	7,862	307,409	231,944
7	4,929	1,063	2,465	41,683	624,154	269,168	538,336	7,743	307,409	232,394
8	4,868	1,057	2,434	41,406	623,615	270,730	541,459	7,647	307,766	233,742
PROMEDIO	**4,975**	**1,058**	**2,487**	**41,586**	**625,739**	**266,112**	**532,223**	**7,815**	**307,521**	**230,878**

Tabla D31

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 4,5 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	5,257	1,149	2,629	52,211	723,025	316,139	632,278	8,258	287,248	218,267
2	5,223	1,158	2,611	52,687	724,462	321,112	642,224	8,204	286,345	218,863
3	5,281	1,184	2,641	53,761	722,397	324,022	648,044	8,296	286,345	220,075
4	5,284	1,187	2,642	53,761	720,791	323,833	647,666	8,301	285,718	220,203
5	5,225	1,176	2,612	53,189	719,982	324,041	648,083	8,207	286,018	220,859
6	5,203	1,184	2,602	53,443	718,643	326,957	653,914	8,173	286,018	222,068
7	5,175	1,179	2,588	53,068	716,459	326,386	652,771	8,130	286,470	222,457
8	5,012	1,158	2,506	52,041	715,319	330,487	660,975	7,873	287,853	225,253
PROMEDIO	**5,208**	**1,172**	**2,604**	**53,020**	**720,135**	**324,122**	**648,244**	**8,180**	**286,502**	**221,006**

Tabla D32

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 5,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	5,431	1,252	2,715	64,221	816,343	376,422	752,844	8,531	268,654	209,868
2	5,491	1,285	2,746	65,892	816,179	381,963	763,926	8,625	268,396	211,837
3	5,469	1,285	2,734	65,803	815,307	383,015	766,031	8,590	268,396	211,974
4	5,392	1,278	2,696	65,490	815,382	386,631	773,262	8,469	268,138	212,854
5	5,290	1,267	2,645	65,315	820,212	393,001	786,002	8,310	267,837	213,662
6	5,391	1,303	2,696	67,190	820,626	396,695	793,390	8,469	268,164	215,221
7	5,372	1,299	2,686	67,049	821,216	397,315	794,630	8,438	267,780	214,885
8	5,266	1,287	2,633	66,308	820,028	400,778	801,557	8,272	267,454	215,859
PROMEDIO	**5,388**	**1,282**	**2,694**	**65,908**	**818,161**	**389,478**	**778,955**	**8,463**	**268,102**	**213,270**

Tabla D33

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 5,5 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	6,748	1,441	3,374	88,249	974,665	416,307	832,614	10,599	239,991	179,454
2	6,602	1,440	3,301	87,358	965,656	421,221	842,442	10,370	239,991	182,418
3	6,619	1,457	3,310	88,202	963,425	424,161	848,322	10,397	240,491	183,691
4	6,546	1,471	3,273	88,291	955,199	429,308	858,616	10,283	240,692	185,920
5	6,318	1,429	3,159	85,158	948,778	429,041	858,082	9,924	240,352	186,672
6	6,302	1,442	3,151	85,673	945,536	432,758	865,515	9,899	241,919	189,525
7	6,340	1,444	3,170	85,644	943,977	429,961	859,921	9,960	241,362	188,829
8	6,269	1,441	3,135	85,113	939,761	432,150	864,300	9,848	241,362	189,791
PROMEDIO	**6,468**	**1,446**	**3,234**	**86,711**	**954,625**	**426,863**	**853,726**	**10,160**	**240,770**	**185,787**

Tabla D34

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 6,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	6,400	1,500	3,200	97,300	1037,400	483,900	967,700	10,100	231,098	182,935
2	6,500	1,500	3,300	99,500	1032,000	485,500	971,000	10,200	230,290	182,914
3	6,400	1,500	3,200	99,200	1028,200	495,800	991,600	10,000	230,744	186,154
4	6,300	1,500	3,200	98,100	1024,500	493,900	987,700	9,900	231,382	186,883
5	6,300	1,500	3,200	98,600	1019,100	497,600	995,200	9,900	231,474	188,453
6	6,300	1,500	3,100	97,800	1014,800	495,900	991,900	9,900	231,753	188,483
7	6,100	1,500	3,100	96,300	1012,100	498,600	997,100	9,700	232,577	190,473
8	6,200	1,500	3,100	96,700	1007,800	497,300	994,700	9,700	232,762	190,340
PROMEDIO	**6,313**	**1,500**	**3,175**	**97,938**	**1021,988**	**493,563**	**987,113**	**9,925**	**231,510**	**187,079**

Tabla D35

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 7,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	7,100	1,800	3,600	136,300	1201,700	608,200	1216,500	11,200	209,699	173,751
2	6,700	1,700	3,400	133,800	1229,800	632,100	1264,200	10,600	209,490	175,755
3	6,900	1,800	3,500	140,600	1225,900	646,200	1292,500	10,900	208,914	177,954
4	7,000	1,900	3,500	141,900	1211,300	645,000	1290,100	11,000	208,546	178,285
5	6,800	1,800	3,400	139,500	1214,400	650,700	1301,400	10,700	210,361	180,790
6	6,700	1,800	3,300	139,000	1207,700	660,400	1320,800	10,500	210,124	183,203
7	6,600	1,800	3,300	138,800	1213,900	667,200	1334,400	10,400	209,924	183,861
8	6,600	1,800	3,300	137,900	1202,600	667,700	1335,400	10,300	209,924	183,724
PROMEDIO	**6,800**	**1,800**	**3,413**	**138,475**	**1213,413**	**647,188**	**1294,413**	**10,700**	**209,623**	**179,665**

Tabla D36

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 8,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	7,600	2,300	3,800	194,300	1344,200	815,200	1630,400	11,900	189,763	169,767
2	6,900	2,500	3,400	184,800	1181,900	853,900	1707,800	10,800	198,198	189,256
3	6,300	2,200	3,200	155,600	1144,900	784,300	1568,600	9,900	210,191	206,062
4	6,100	2,100	3,000	145,800	1126,200	765,900	1531,900	9,500	213,317	209,981
5	5,900	2,000	3,000	141,200	1117,100	761,600	1523,200	9,300	215,809	212,709
6	5,800	2,000	2,900	139,700	1106,400	769,400	1538,700	9,100	216,906	216,168
7	5,700	2,000	2,800	137,100	1097,800	766,800	1533,600	8,900	217,752	217,402
8	5,600	2,000	2,800	135,900	1088,800	772,100	1544,100	8,800	219,130	220,551
PROMEDIO	**6,238**	**2,138**	**3,113**	**154,300**	**1150,913**	**786,150**	**1572,288**	**9,775**	**210,133**	**205,237**

Tabla D37

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 9,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	6,200	2,200	3,100	178,900	1310,100	922,600	1845,300	9,700	200,653	200,463
2	6,100	2,200	3,000	176,100	1284,600	922,400	1844,700	9,500	202,576	204,151
3	6,000	2,200	3,000	173,600	1278,200	920,000	1839,900	9,400	204,855	207,888
4	6,000	2,200	3,000	172,800	1266,700	918,500	1837,000	9,400	204,853	208,680
5	5,900	2,100	2,900	169,400	1257,600	918,200	1836,400	9,200	206,168	210,596
6	5,700	2,100	2,900	166,000	1248,700	921,200	1842,400	9,000	207,078	213,156
7	5,800	2,100	2,900	167,300	1248,900	917,400	1834,800	9,100	207,691	213,577
8	5,800	2,100	2,900	166,700	1242,300	918,800	1837,500	9,100	208,066	214,190
PROMEDIO	**5,938**	**2,150**	**2,963**	**171,350**	**1267,138**	**919,888**	**1839,750**	**9,300**	**205,242**	**209,088**

D.2.- Resultados Disipación de Energía para la Temperatura de Ensayo Alta

La siguiente Tabla muestra el resultado bajo las siguientes Condiciones:

4. Temperatura de Ensayo: Alta, 50 [ºC] aproximadamente.
5. Frecuencia de Oscilación: 1 [Hz].
6. Número de ciclos: 10.

D.2.1.- Resultados Disipación de Energía para Tamaño de Grano Fino

Tabla D38

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 0,5 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	1,810	0,538	0,905	0,442	13,084	7,781	15,562	2,843	1000,900	879,800
2	0,125	0,015	0,062	0,014	14,210	3,461	6,921	0,196	1000,900	873,800
3	0,206	0,024	0,103	0,021	14,248	3,305	6,610	0,324	1015,700	914,900
4	0,512	0,059	0,256	0,056	14,977	3,461	6,921	0,804	1000,900	873,800
5	0,209	0,025	0,105	0,023	14,424	3,422	6,844	0,328	1000,900	883,700
6	0,777	0,091	0,388	0,084	14,576	3,422	6,844	1,220	1001,700	883,700
7	0,564	0,065	0,282	0,061	14,776	3,422	6,844	0,886	1001,700	883,700
8	0,398	0,046	0,199	0,043	14,759	3,422	6,844	0,625	1001,700	883,700
PROMEDIO	**0,575**	**0,108**	**0,287**	**0,093**	**14,382**	**3,962**	**7,924**	**0,903**	**1003,050**	**884,638**

Tabla D39

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 1,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	1,019	0,230	0,509	0,653	45,202	20,398	40,795	1,600	902,070	798,712
2	0,895	0,209	0,448	0,597	45,394	21,240	42,480	1,406	908,889	810,061
3	0,860	0,201	0,430	0,567	44,915	20,962	41,924	1,351	908,889	820,814
4	0,864	0,199	0,432	0,565	45,276	20,812	41,623	1,357	899,206	807,767
5	0,934	0,224	0,467	0,641	45,505	21,838	43,675	1,468	905,392	818,489
6	0,947	0,213	0,474	0,617	46,102	20,731	41,462	1,488	894,643	804,626
7	1,171	0,279	0,585	0,781	44,622	21,229	42,458	1,839	896,878	816,741
8	0,688	0,169	0,344	0,465	43,735	21,508	43,016	1,081	896,361	806,134
PROMEDIO	**0,922**	**0,215**	**0,461**	**0,611**	**45,094**	**21,090**	**42,179**	**1,449**	**901,541**	**810,418**

Tabla D40

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 1,5 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	21,221	0,008	10,610	0,001	1,428	0,001	0,002	33,333	675,713	237,667
2	2,840	0,602	1,420	4,197	110,978	47,042	94,085	4,460	675,713	567,975
3	2,902	0,660	1,451	4,334	104,588	47,535	95,071	4,558	675,713	565,561
4	2,560	0,593	1,280	3,882	104,233	48,281	96,562	4,021	691,182	591,621
5	2,430	0,587	1,215	3,780	102,403	49,511	99,022	3,817	693,777	597,779
6	2,348	0,551	1,174	3,590	103,747	48,659	97,318	3,689	696,525	608,240
7	2,461	0,594	1,231	3,824	102,479	49,456	98,911	3,866	696,525	609,025
8	2,280	0,575	1,140	3,503	97,025	48,903	97,805	3,582	697,782	605,214
PROMEDIO	**4,880**	**0,521**	**2,440**	**3,389**	**90,860**	**42,423**	**84,847**	**7,666**	**687,866**	**547,885**

Tabla D41

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	3,390	0,782	1,695	8,192	166,718	76,931	153,862	5,324	567,420	475,234
2	2,934	0,804	1,467	8,408	166,494	91,208	182,417	4,609	569,938	501,683
3	2,405	0,575	1,203	7,819	216,353	103,485	206,969	3,778	505,936	423,595
4	3,130	1,110	1,565	11,527	165,250	117,226	234,452	4,917	505,936	443,593
5	3,006	0,789	1,503	7,813	157,658	82,726	165,453	4,722	577,015	502,169
6	2,565	0,663	1,282	7,545	181,066	93,644	187,288	4,029	549,216	479,456
7	2,798	0,834	1,399	8,477	161,861	96,416	192,832	4,396	549,216	485,844
8	2,699	0,721	1,350	7,880	173,927	92,920	185,840	4,240	564,145	499,434
PROMEDIO	**2,866**	**0,785**	**1,433**	**8,458**	**173,666**	**94,319**	**188,639**	**4,502**	**548,603**	**476,376**

Tabla D42

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,3 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	3,101	0,793	1,551	10,580	212,427	108,591	217,182	4,872	509,238	439,454
2	3,296	0,839	1,648	11,277	213,834	108,900	217,800	5,178	509,627	438,207
3	3,144	0,758	1,572	10,726	225,234	108,585	217,170	4,939	493,280	415,455
4	3,566	0,904	1,783	11,687	205,723	104,323	208,646	5,601	493,280	408,130
5	2,885	0,688	1,443	11,148	258,032	122,981	245,961	4,532	460,078	386,243
6	2,480	1,368	1,240	11,597	134,959	148,837	297,673	3,896	460,078	413,951
7	3,607	0,288	1,803	1,833	101,364	16,174	32,348	5,665	538,031	253,812
8	3,871	0,014	1,936	0,013	15,002	0,106	0,211	6,081	486,694	154,270
PROMEDIO	**3,244**	**0,706**	**1,622**	**8,608**	**170,822**	**89,812**	**179,624**	**5,096**	**493,788**	**363,690**

Tabla D43

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,6 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	3,494	0,894	1,747	14,492	258,124	132,029	264,059	5,488	459,568	395,600
2	3,356	0,883	1,678	14,929	269,090	141,577	283,154	5,272	450,740	393,759
3	3,774	0,971	1,887	15,230	249,697	128,458	256,915	5,928	450,740	378,386
4	2,976	0,990	1,488	14,621	235,115	156,408	312,816	4,674	461,334	424,927
5	2,887	0,861	1,443	12,992	240,228	143,258	286,516	4,535	479,839	438,860
6	3,010	0,885	1,505	13,543	243,627	143,211	286,422	4,728	476,755	435,476
7	2,952	0,884	1,476	13,389	241,054	144,385	288,770	4,637	474,273	433,683
8	2,925	0,853	1,463	13,103	244,421	142,579	285,158	4,595	475,102	430,365
PROMEDIO	**3,172**	**0,902**	**1,586**	**14,037**	**247,669**	**141,488**	**282,976**	**4,982**	**466,044**	**416,382**

Tabla D44

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	5,251	1,184	2,626	27,813	373,915	168,603	337,206	8,248	360,562	286,971
2	4,359	1,192	2,179	26,555	354,721	193,935	387,870	6,846	364,733	312,548
3	4,542	0,958	2,271	23,061	383,203	161,601	323,202	7,135	359,360	279,158
4	4,493	1,014	2,247	26,714	419,363	189,261	378,521	7,058	344,665	278,415
5	4,451	1,248	2,226	30,190	384,873	215,902	431,803	6,992	340,823	295,905
6	4,779	1,275	2,390	24,389	304,473	162,433	324,866	7,507	366,607	292,431
7	3,105	0,870	1,553	23,831	435,951	244,310	488,621	4,877	341,252	311,719
8	4,008	1,346	2,004	29,188	345,184	231,806	463,612	6,296	341,252	304,950
PROMEDIO	**4,373**	**1,136**	**2,187**	**26,468**	**375,210**	**195,981**	**391,963**	**6,870**	**352,407**	**295,262**

Tabla D45

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,3 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	3,523	0,975	1,762	22,240	363,149	200,942	401,883	5,534	371,057	333,346
2	3,673	1,063	1,837	24,749	370,582	214,480	428,960	5,770	366,364	337,131
3	3,851	1,107	1,926	25,119	361,300	207,607	415,214	6,050	366,364	332,786
4	3,604	1,083	1,802	24,387	358,414	215,383	430,766	5,661	371,692	345,870
5	3,625	1,046	1,813	24,114	367,064	211,738	423,477	5,694	367,293	336,390
6	3,877	1,035	1,939	24,165	371,719	198,386	396,772	6,090	364,165	322,029
7	3,622	1,083	1,811	24,805	364,487	217,982	435,965	5,690	363,571	335,461
8	3,697	1,098	1,848	24,711	358,149	212,769	425,538	5,807	368,227	339,843
PROMEDIO	**3,684**	**1,061**	**1,842**	**24,286**	**364,358**	**209,911**	**419,822**	**5,787**	**367,342**	**335,357**

Tabla D46

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,6 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	3,647	1,065	1,823	26,634	398,102	232,491	464,982	5,728	351,355	323,983
2	3,729	1,078	1,865	27,244	402,291	232,560	465,120	5,858	348,600	320,325
3	3,737	1,138	1,868	29,028	405,935	247,276	494,552	5,869	346,690	327,422
4	3,746	1,130	1,873	28,850	406,367	245,123	490,245	5,885	345,878	325,630
5	3,712	1,128	1,856	28,655	404,228	245,722	491,444	5,831	345,878	324,836
6	3,560	1,171	1,780	28,966	393,573	258,961	517,922	5,593	346,403	335,214
7	3,600	1,066	1,800	27,125	404,961	239,807	479,614	5,656	345,321	322,234
8	3,541	1,150	1,770	28,534	395,029	256,537	513,074	5,561	345,321	332,611
PROMEDIO	**3,659**	**1,116**	**1,830**	**28,129**	**401,311**	**244,810**	**489,619**	**5,748**	**346,931**	**326,532**

Tabla D47

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 4,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	5,407	1,324	2,704	44,118	530,153	259,706	519,412	8,494	290,259	245,013
2	5,475	1,348	2,738	44,641	527,248	259,528	519,055	8,600	289,527	245,181
3	5,484	1,420	2,742	45,066	505,178	261,605	523,209	8,613	288,179	247,144
4	5,108	1,308	2,554	42,616	518,529	265,544	531,088	8,024	289,823	252,250
5	5,226	1,324	2,613	43,172	518,979	262,955	525,911	8,209	289,893	249,791
6	5,245	1,337	2,622	43,326	515,656	262,955	525,911	8,238	288,543	249,791
7	5,198	1,335	2,599	43,132	514,065	264,113	528,225	8,166	289,456	252,629
8	5,105	1,333	2,552	42,829	511,367	267,061	534,122	8,019	289,456	254,744
PROMEDIO	**5,281**	**1,341**	**2,641**	**43,612**	**517,647**	**262,933**	**525,867**	**8,295**	**289,392**	**249,568**

Tabla D48

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 4,5 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	5,561	1,420	2,781	53,462	599,181	306,006	612,012	8,735	263,092	228,382
2	5,722	1,490	2,861	55,632	594,451	309,493	618,985	8,988	261,889	230,140
3	5,539	1,452	2,770	54,097	593,146	310,868	621,736	8,701	263,092	231,728
4	5,537	1,530	2,769	55,026	572,267	316,313	632,627	8,698	261,889	234,640
5	5,103	1,392	2,552	51,337	587,004	320,217	640,433	8,016	263,983	238,697
6	5,468	1,454	2,734	53,707	587,850	312,641	625,281	8,589	263,494	234,766
7	5,301	1,483	2,651	53,364	572,861	320,413	640,827	8,327	263,092	237,681
8	5,149	1,429	2,574	51,319	571,709	317,276	634,552	8,088	266,381	241,790
PROMEDIO	**5,423**	**1,456**	**2,711**	**53,493**	**584,809**	**314,153**	**628,307**	**8,518**	**263,364**	**234,728**

Tabla D49

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 5,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	5,789	1,537	2,895	64,248	665,361	353,256	706,512	9,094	243,289	216,373
2	5,818	1,573	2,909	65,459	662,223	358,164	716,328	9,138	242,793	218,894
3	5,734	1,602	2,867	65,465	650,509	363,437	726,874	9,006	241,703	220,408
4	5,730	1,600	2,865	64,582	642,539	358,751	717,502	9,001	244,191	221,698
5	5,701	1,606	2,850	64,164	635,825	358,262	716,523	8,955	244,357	220,414
6	5,441	1,524	2,721	61,263	639,904	358,395	716,789	8,547	246,091	222,714
7	5,582	1,556	2,791	62,123	635,354	354,248	708,496	8,768	245,721	222,113
8	5,491	1,547	2,746	61,484	632,595	356,397	712,794	8,626	246,731	223,962
PROMEDIO	**5,661**	**1,568**	**2,830**	**63,598**	**645,539**	**357,614**	**715,227**	**8,892**	**244,359**	**220,822**

Tabla D50

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 5,5 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	5,955	1,661	2,977	75,296	721,530	402,485	804,971	9,354	228,488	207,629
2	6,126	1,703	3,063	76,657	716,385	398,314	796,629	9,623	228,488	209,072
3	6,161	1,748	3,081	77,185	702,904	398,780	797,560	9,678	228,151	204,470
4	6,013	1,690	3,006	74,736	703,668	395,657	791,315	9,445	229,527	205,357
5	6,093	1,749	3,047	74,521	678,109	389,311	778,622	9,571	229,527	199,211
6	5,733	1,645	2,866	71,142	688,411	395,008	790,016	9,005	232,754	208,617
7	5,889	1,675	2,944	72,138	685,644	389,927	779,853	9,250	232,408	207,637
8	5,805	1,659	2,902	71,429	685,471	391,680	783,360	9,118	232,528	209,651
PROMEDIO	**5,972**	**1,691**	**2,986**	**74,138**	**697,765**	**395,145**	**790,291**	**9,380**	**230,234**	**206,456**

Tabla D51

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 6,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	7,283	1,961	3,641	102,742	833,939	449,070	898,140	11,440	202,225	180,931
2	7,151	1,914	3,575	99,929	830,970	444,837	889,675	11,232	203,055	182,653
3	7,111	1,939	3,555	99,675	818,239	446,186	892,372	11,170	203,055	184,040
4	6,977	1,939	3,488	98,429	807,927	449,093	898,186	10,959	202,716	186,083
5	6,715	1,943	3,358	96,418	789,619	457,037	914,073	10,548	203,724	190,587
6	6,565	1,831	3,283	91,848	798,209	445,326	890,653	10,312	204,866	188,968
7	6,588	1,863	3,294	93,136	795,647	450,026	900,052	10,348	204,866	190,261
8	6,589	1,881	3,295	93,668	792,356	452,505	905,009	10,350	204,866	191,838
PROMEDIO	**6,872**	**1,909**	**3,436**	**96,981**	**808,363**	**449,260**	**898,520**	**10,795**	**203,672**	**186,920**

Tabla D52

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 7,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	7,700	2,200	3,900	135,300	967,500	558,500	1117,000	12,100	181,942	171,246
2	7,300	2,300	3,700	135,200	929,000	586,800	1173,500	11,500	181,570	178,230
3	7,000	2,200	3,500	129,600	920,500	589,900	1179,900	11,000	185,499	186,235
4	6,900	2,200	3,400	127,700	924,200	590,400	1180,800	10,800	185,024	186,087
5	6,900	2,100	3,400	124,500	926,900	574,900	1149,800	10,800	184,582	181,917
6	6,900	2,300	3,400	129,300	900,100	596,600	1193,200	10,800	183,288	185,831
7	6,700	2,200	3,300	124,000	899,700	590,500	1180,900	10,500	186,662	190,624
8	6,600	2,200	3,300	123,600	887,600	598,600	1197,200	10,300	185,610	192,013
PROMEDIO	**7,000**	**2,213**	**3,488**	**128,650**	**919,438**	**585,775**	**1171,538**	**10,975**	**184,272**	**184,023**

Tabla D53

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 8,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	7,600	2,600	3,800	174,100	1065,100	726,200	1452,400	12,000	165,856	171,745
2	7,400	2,600	3,700	169,600	1040,000	732,000	1464,100	11,600	168,872	178,743
3	7,300	2,600	3,600	166,200	1031,000	725,600	1451,200	11,500	170,411	181,842
4	7,100	2,500	3,600	162,000	1014,100	724,300	1448,600	11,200	170,099	182,677
5	7,000	2,500	3,500	159,300	1006,000	723,900	1447,800	11,000	171,225	184,806
6	6,900	2,500	3,500	156,400	1002,300	718,300	1436,500	10,900	171,794	185,745
7	6,900	2,500	3,500	154,900	995,500	713,000	1426,000	10,900	171,557	185,052
8	6,700	2,500	3,400	154,600	978,900	731,200	1462,500	10,600	171,842	188,553
PROMEDIO	**7,113**	**2,538**	**3,575**	**162,138**	**1016,613**	**724,313**	**1448,638**	**11,213**	**170,207**	**182,395**

Tabla D54

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 9,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	12,700	4,000	6,400	326,600	1315,800	815,900	1631,800	20,000	149,946	151,120
2	9,000	3,000	4,500	227,800	1227,000	809,000	1618,000	14,100	149,750	151,967
3	8,600	3,000	4,300	222,200	1182,400	822,900	1645,700	13,500	151,040	159,019
4	7,700	2,800	3,900	216,700	1242,100	892,100	1784,300	12,100	150,330	163,056
5	8,200	3,000	4,100	234,200	1246,300	908,100	1816,300	12,900	149,137	163,595
6	8,200	3,000	4,100	236,400	1238,900	920,200	1840,400	12,800	149,129	165,274
7	8,000	3,100	4,000	235,700	1225,500	934,400	1868,800	12,600	149,129	167,425
8	7,900	3,000	4,000	231,500	1216,200	931,400	1862,800	12,400	149,455	168,395
PROMEDIO	**8,788**	**3,113**	**4,413**	**241,388**	**1236,775**	**879,250**	**1758,513**	**13,800**	**149,740**	**161,231**

D.2.2.- Resultados Disipación de Energía para Tamaño de Grano Medio

Tabla D55

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 0,5 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	0,541	0,158	0,270	0,068	6,820	3,989	7,977	0,850	1122,300	1030,100
2	0,441	0,130	0,220	0,054	6,585	3,898	7,796	0,692	1122,300	1054,000
3	0,836	0,348	0,418	0,104	4,737	3,943	7,886	1,314	1143,100	1041,900
4	0,369	0,107	0,184	0,048	7,077	4,102	8,205	0,579	1125,400	1059,500
5	0,298	0,093	0,149	0,039	6,746	4,196	8,391	0,468	1125,400	1036,000
6	0,382	0,117	0,191	0,048	6,605	4,034	8,068	0,599	1122,300	1018,500
7	0,016	0,005	0,008	0,002	7,325	4,242	8,485	0,025	1125,400	1024,600
8	0,301	0,091	0,151	0,040	6,919	4,196	8,391	0,473	1125,400	1036,000
PROMEDIO	**0,398**	**0,131**	**0,199**	**0,050**	**6,602**	**4,075**	**8,150**	**0,625**	**1126,450**	**1037,575**

Tabla D56

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 1,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	0,010	0,004	0,005	0,010	37,052	31,259	62,517	0,015	1055,900	1016,500
2	0,105	0,046	0,053	0,102	35,656	30,813	61,626	0,165	1050,000	1010,100
3	0,170	0,072	0,085	0,165	36,455	30,881	61,761	0,267	1058,100	1028,900
4	0,110	0,049	0,055	0,109	35,283	31,619	63,237	0,172	1058,100	1011,800
5	0,159	0,071	0,080	0,154	34,403	30,775	61,550	0,250	1062,000	1025,400
6	0,119	0,051	0,060	0,114	35,320	30,458	60,915	0,187	1051,700	1014,800
7	0,189	0,084	0,095	0,183	34,836	30,775	61,550	0,297	1062,000	1025,400
8	0,215	0,094	0,107	0,208	35,226	30,880	61,761	0,337	1065,400	1028,900
PROMEDIO	**0,135**	**0,059**	**0,067**	**0,131**	**35,529**	**30,932**	**61,865**	**0,211**	**1057,900**	**1020,225**

Tabla D57

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 1,5 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	0,477	0,213	0,239	1,003	74,928	66,956	133,912	0,749	937,887	912,898
2	0,437	0,193	0,218	0,904	74,627	65,919	131,838	0,686	948,037	922,691
3	0,572	0,252	0,286	1,185	74,902	65,919	131,838	0,899	948,037	922,691
4	0,492	0,219	0,246	1,019	74,152	65,919	131,838	0,773	948,037	922,691
5	0,455	0,200	0,228	0,941	74,713	65,756	131,512	0,715	948,037	920,407
6	0,366	0,165	0,183	0,758	72,962	65,919	131,838	0,575	948,037	922,691
7	0,551	0,246	0,275	1,117	72,332	64,564	129,127	0,865	953,815	928,113
8	0,314	0,139	0,157	0,627	71,636	63,577	127,154	0,493	949,638	923,809
PROMEDIO	**0,458**	**0,203**	**0,229**	**0,944**	**73,781**	**65,566**	**131,132**	**0,719**	**947,691**	**921,999**

Tabla D58

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	1,521	0,595	0,761	5,116	136,773	107,058	214,116	2,389	757,203	739,749
2	1,423	0,556	0,711	4,735	135,634	105,932	211,864	2,235	752,174	734,697
3	1,450	0,569	0,725	4,838	135,233	106,230	212,460	2,277	759,841	742,284
4	1,560	0,612	0,780	5,172	134,594	105,537	211,075	2,450	754,991	737,443
5	1,426	0,565	0,713	4,698	132,293	104,913	209,825	2,239	756,205	738,589
6	1,491	0,589	0,745	4,835	130,719	103,245	206,489	2,341	758,465	740,678
7	1,426	0,560	0,713	4,599	130,828	102,658	205,316	2,240	762,807	744,911
8	1,410	0,557	0,705	4,548	129,946	102,658	205,316	2,215	762,807	744,911
PROMEDIO	**1,463**	**0,575**	**0,732**	**4,818**	**133,252**	**104,779**	**209,558**	**2,298**	**758,062**	**740,408**

Tabla D59

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,3 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	1,866	0,695	0,933	7,749	177,551	132,190	264,380	2,931	664,083	649,511
2	1,933	0,716	0,967	7,979	177,275	131,364	262,727	3,037	660,017	645,451
3	2,000	0,745	1,000	8,254	176,328	131,364	262,727	3,142	660,017	645,451
4	1,952	0,725	0,976	8,031	176,306	130,952	261,904	3,067	662,096	647,481
5	1,969	0,738	0,984	8,099	174,679	130,952	261,904	3,092	662,096	647,481
6	1,935	0,722	0,968	7,924	174,647	130,334	260,668	3,040	665,239	650,550
7	1,958	0,732	0,979	8,019	174,372	130,334	260,668	3,076	665,239	650,550
8	1,800	0,676	0,900	7,355	173,075	130,061	260,122	2,828	663,873	649,186
PROMEDIO	**1,927**	**0,719**	**0,963**	**7,926**	**175,529**	**130,944**	**261,887**	**3,027**	**662,833**	**648,208**

Tabla D60

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,6 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	2,241	0,808	1,121	11,223	221,194	159,397	318,795	3,521	589,888	577,475
2	2,304	0,834	1,152	11,535	220,214	159,397	318,795	3,618	589,888	577,475
3	2,217	0,804	1,109	10,983	217,484	157,689	315,378	3,483	586,816	574,374
4	2,150	0,786	1,075	10,607	214,868	157,051	314,101	3,377	589,205	576,709
5	2,212	0,798	1,106	10,838	216,035	155,986	311,973	3,474	593,230	580,643
6	2,153	0,791	1,077	10,551	212,322	155,986	311,973	3,382	593,230	580,643
7	2,221	0,812	1,111	10,877	213,140	155,865	311,730	3,489	597,310	588,188
8	2,224	0,812	1,112	10,822	212,242	154,922	309,845	3,493	597,310	584,631
PROMEDIO	**2,215**	**0,805**	**1,108**	**10,929**	**215,937**	**157,037**	**314,074**	**3,480**	**592,109**	**580,017**

Tabla D61

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	2,634	0,922	1,317	16,181	279,375	195,560	391,120	4,137	517,788	507,366
2	2,611	0,927	1,306	15,932	273,637	194,202	388,403	4,102	514,835	504,991
3	2,587	0,910	1,294	15,696	274,404	193,110	386,220	4,064	519,574	513,803
4	2,540	0,893	1,270	15,373	274,135	192,652	385,303	3,990	518,977	509,054
5	2,533	0,900	1,266	15,329	271,205	192,652	385,303	3,978	518,977	509,054
6	2,579	0,909	1,289	15,434	270,164	190,508	381,016	4,051	521,582	512,777
7	2,453	0,870	1,226	14,646	267,985	190,066	380,132	3,853	522,792	513,970
8	2,559	0,906	1,279	15,226	267,544	189,403	378,806	4,019	524,618	515,769
PROMEDIO	**2,562**	**0,904**	**1,281**	**15,477**	**272,306**	**192,269**	**384,538**	**4,024**	**519,893**	**510,848**

Tabla D62

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,3 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	13,558	4,776	6,779	94,705	315,598	222,343	444,686	21,297	479,616	481,512
2	2,640	0,914	1,320	18,431	320,940	222,216	444,431	4,147	475,394	467,515
3	2,890	1,006	1,445	20,172	319,214	222,216	444,431	4,539	472,743	467,515
4	2,813	0,973	1,407	19,447	317,975	220,047	440,093	4,419	473,713	466,773
5	2,738	0,956	1,369	18,890	314,495	219,593	439,187	4,301	474,687	467,737
6	2,727	0,952	1,363	18,996	317,483	221,760	443,520	4,283	473,713	468,476
7	2,834	0,994	1,417	19,532	312,670	219,367	438,733	4,452	473,713	468,220
8	2,699	0,945	1,350	18,611	313,625	219,481	438,961	4,240	477,138	473,341
PROMEDIO	**4,112**	**1,440**	**2,056**	**28,598**	**316,500**	**220,878**	**441,755**	**6,460**	**475,090**	**470,136**

Tabla D63

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,6 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	14,268	4,947	7,134	113,559	365,336	253,341	506,682	22,412	438,060	441,729
2	2,933	1,003	1,466	23,366	370,670	253,608	507,216	4,607	435,209	430,065
3	3,126	1,076	1,563	24,994	369,764	254,545	509,091	4,910	434,418	431,654
4	3,069	1,064	1,534	24,359	364,475	252,673	505,346	4,820	432,049	430,061
5	3,230	1,103	1,615	25,281	364,741	249,183	498,366	5,073	435,234	431,252
6	2,978	1,036	1,489	23,509	361,251	251,272	502,545	4,678	435,234	434,060
7	3,056	1,052	1,528	23,853	360,963	248,483	496,965	4,800	436,450	435,696
8	3,019	1,036	1,509	23,522	361,473	248,024	496,048	4,742	436,441	433,267
PROMEDIO	**4,460**	**1,540**	**2,230**	**35,305**	**364,834**	**251,391**	**502,782**	**7,005**	**435,387**	**433,473**

Tabla D64

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 4,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	14,864	5,105	7,432	136,747	426,340	292,840	585,681	23,348	398,668	403,354
2	3,404	1,144	1,702	31,222	434,245	291,936	583,871	5,347	392,920	390,359
3	3,471	1,174	1,735	31,748	430,395	291,170	582,339	5,452	392,222	389,972
4	3,503	1,191	1,751	32,220	430,699	292,799	585,599	5,502	392,920	393,442
5	3,419	1,163	1,710	31,280	428,067	291,220	582,439	5,371	392,920	391,319
6	3,424	1,171	1,712	31,165	423,633	289,740	579,480	5,378	392,858	391,896
7	3,354	1,151	1,677	30,600	423,067	290,399	580,799	5,269	394,775	396,693
8	3,341	1,135	1,671	30,098	421,919	286,743	573,487	5,248	392,668	391,699
PROMEDIO	**4,847**	**1,654**	**2,424**	**44,385**	**427,296**	**290,856**	**581,712**	**7,614**	**393,744**	**393,592**

D.2.3.- Resultados Disipación de Energía para Tamaño de Grano Grueso

Tabla D65

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 0,5 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	0,379	0,083	0,190	0,064	12,307	5,396	10,791	0,596	1264,600	1079,100
2	0,142	0,033	0,071	0,025	11,858	5,525	11,050	0,223	1258,500	1105,000
3	0,064	0,014	0,032	0,010	11,833	5,138	10,277	0,101	1276,200	1115,100
4	0,122	0,027	0,061	0,020	11,956	5,288	10,576	0,192	1276,200	1101,200
5	0,010	0,002	0,005	0,002	12,177	5,372	10,745	0,016	1276,500	1118,800
6	0,350	0,079	0,175	0,059	11,855	5,372	10,745	0,551	1276,500	1118,800
7	0,238	0,051	0,119	0,038	11,963	5,138	10,277	0,374	1276,200	1115,100
8	0,276	0,059	0,138	0,045	12,150	5,180	10,360	0,433	1282,600	1124,100
PROMEDIO	**0,198**	**0,044**	**0,099**	**0,033**	**12,012**	**5,301**	**10,602**	**0,311**	**1273,413**	**1109,650**

Tabla D66

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 1,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	0,022	0,007	0,011	0,023	51,897	34,317	68,635	0,034	1151,100	1063,800
2	0,197	0,065	0,099	0,214	51,995	34,510	69,020	0,310	1159,000	1078,300
3	0,135	0,045	0,068	0,147	51,989	34,510	69,020	0,213	1159,000	1078,300
4	0,045	0,019	0,023	0,049	41,259	34,401	68,801	0,071	1156,000	1074,900
5	0,005	0,002	0,002	0,005	52,419	33,938	67,877	0,008	1151,100	1068,900
6	0,030	0,010	0,015	0,033	53,504	34,342	68,685	0,048	1148,200	1056,300
7	0,042	0,014	0,021	0,047	53,567	35,167	70,333	0,066	1151,100	1064,900
8	0,076	0,024	0,038	0,083	54,216	34,858	69,716	0,119	1139,600	1047,300
PROMEDIO	**0,069**	**0,023**	**0,035**	**0,075**	**51,356**	**34,505**	**69,011**	**0,108**	**1151,888**	**1066,588**

Tabla D67

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 1,5 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	0,775	0,296	0,387	1,811	97,495	74,442	148,884	1,217	981,882	921,291
2	0,785	0,300	0,393	1,835	97,333	74,417	148,834	1,233	983,329	930,215
3	0,829	0,319	0,414	1,924	96,062	73,899	147,798	1,302	983,329	923,740
4	0,817	0,315	0,409	1,883	95,131	73,345	146,690	1,283	984,214	930,720
5	0,718	0,279	0,359	1,657	94,625	73,516	147,033	1,127	989,074	932,894
6	0,686	0,264	0,343	1,576	94,856	73,146	146,292	1,077	989,074	937,618
7	0,795	0,308	0,397	1,836	95,002	73,530	147,059	1,248	989,074	928,382
8	0,695	0,268	0,347	1,597	94,809	73,146	146,292	1,091	989,074	937,618
PROMEDIO	**0,762**	**0,294**	**0,381**	**1,765**	**95,664**	**73,680**	**147,360**	**1,197**	**986,131**	**930,310**

Tabla D68

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	1,621	0,621	0,811	6,083	156,046	119,441	238,881	2,547	798,210	764,467
2	1,506	0,573	0,753	5,565	154,568	117,655	235,310	2,365	803,552	766,691
3	1,526	0,588	0,763	5,620	152,178	117,230	234,461	2,397	801,757	769,471
4	1,545	0,595	0,773	5,661	151,505	116,593	233,187	2,428	809,153	773,676
5	1,471	0,568	0,735	5,325	149,320	115,249	230,498	2,310	804,264	773,181
6	1,394	0,538	0,697	5,010	148,329	114,405	228,809	2,190	810,255	778,888
7	1,497	0,584	0,749	5,361	146,014	113,982	227,965	2,352	813,284	781,772
8	1,364	0,528	0,682	4,839	145,805	112,927	225,854	2,143	820,957	789,079
PROMEDIO	**1,491**	**0,574**	**0,745**	**5,433**	**150,471**	**115,935**	**231,871**	**2,341**	**807,679**	**774,653**

Tabla D69

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,3 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	1,768	0,664	0,884	7,796	186,750	140,339	280,678	2,778	722,164	696,084
2	1,854	0,691	0,927	8,011	184,662	137,539	275,079	2,912	727,288	701,954
3	1,812	0,679	0,906	7,780	182,431	136,661	273,321	2,847	731,995	706,468
4	1,736	0,653	0,868	7,356	179,371	134,858	269,715	2,727	736,560	713,107
5	1,711	0,638	0,856	7,148	178,299	132,971	265,942	2,688	738,355	714,705
6	1,727	0,647	0,863	7,190	176,987	132,535	265,070	2,712	740,792	717,056
7	1,728	0,646	0,864	7,145	175,918	131,620	263,240	2,714	744,478	719,185
8	1,770	0,663	0,885	7,307	175,487	131,445	262,890	2,780	746,955	723,002
PROMEDIO	**1,763**	**0,660**	**0,882**	**7,467**	**179,988**	**134,746**	**269,492**	**2,770**	**736,073**	**711,445**

Tabla D70

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 2,6 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	2,103	0,770	1,051	10,450	215,973	158,179	316,359	3,303	669,808	649,335
2	1,999	0,732	1,000	9,815	213,316	156,295	312,590	3,140	675,360	654,664
3	1,999	0,739	0,999	9,658	208,022	153,826	307,652	3,139	676,510	657,578
4	1,966	0,731	0,983	9,288	202,345	150,413	300,826	3,088	681,424	662,211
5	1,893	0,691	0,947	8,786	202,339	147,735	295,471	2,974	693,776	674,215
6	1,953	0,726	0,977	9,048	198,311	147,450	294,899	3,068	692,473	672,911
7	1,959	0,732	0,979	8,911	193,767	144,821	289,641	3,077	696,982	677,180
8	1,830	0,671	0,915	8,470	200,915	147,289	294,578	2,875	695,879	676,258
PROMEDIO	**1,963**	**0,724**	**0,981**	**9,303**	**204,373**	**150,751**	**301,502**	**3,083**	**685,276**	**665,544**

Tabla D71

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	2,280	0,809	1,140	12,949	254,646	180,802	361,605	3,581	610,956	594,354
2	2,327	0,835	1,164	13,133	250,471	179,644	359,287	3,655	614,898	598,188
3	2,207	0,794	1,104	12,290	246,442	177,226	354,453	3,467	620,185	604,089
4	2,222	0,798	1,111	12,183	243,146	174,526	349,053	3,490	621,355	604,316
5	2,124	0,760	1,062	11,591	242,843	173,704	347,408	3,337	628,278	609,461
6	2,196	0,790	1,098	11,933	240,301	173,014	346,028	3,449	628,278	611,892
7	2,148	0,766	1,074	11,573	240,437	171,541	343,082	3,373	631,324	614,833
8	2,129	0,764	1,065	11,474	238,943	171,541	343,082	3,345	631,324	614,833
PROMEDIO	**2,204**	**0,789**	**1,102**	**12,141**	**244,654**	**175,250**	**350,500**	**3,462**	**623,325**	**606,496**

Tabla D72

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,3 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	2,320	0,810	1,160	14,247	279,908	195,494	390,988	3,644	581,773	566,189
2	2,348	0,835	1,174	14,418	274,703	195,494	390,988	3,688	581,773	566,189
3	2,271	0,795	1,136	13,931	278,897	195,259	390,518	3,567	581,773	566,871
4	2,303	0,817	1,152	14,128	275,269	195,259	390,518	3,618	581,773	566,871
5	2,358	0,838	1,179	14,333	272,359	193,491	386,983	3,704	585,666	569,950
6	2,305	0,813	1,153	13,876	271,496	191,613	383,225	3,621	589,962	575,538
7	2,335	0,825	1,168	13,944	269,078	190,089	380,178	3,668	588,234	573,770
8	2,264	0,804	1,132	13,454	266,447	189,155	378,310	3,556	591,132	576,604
PROMEDIO	**2,313**	**0,817**	**1,156**	**14,041**	**273,520**	**193,232**	**386,463**	**3,633**	**585,261**	**570,248**

Tabla D73

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 3,6 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	3,212	1,051	1,606	26,655	403,845	264,127	528,254	5,046	465,463	450,387
2	3,113	1,054	1,556	26,102	394,170	266,905	533,811	4,890	468,449	456,810
3	3,016	1,024	1,508	24,875	386,611	262,558	525,116	4,737	471,770	459,515
4	2,991	1,021	1,496	24,546	382,633	261,188	522,377	4,699	477,091	468,442
5	2,923	0,994	1,462	23,739	380,072	258,511	517,021	4,592	480,251	471,645
6	2,857	0,977	1,428	23,133	376,862	257,770	515,540	4,487	480,799	473,000
7	2,807	0,963	1,403	22,620	373,881	256,535	513,071	4,409	483,091	475,276
8	2,899	0,988	1,450	23,133	372,676	253,962	507,924	4,554	482,923	475,070
PROMEDIO	**2,977**	**1,009**	**1,489**	**24,350**	**383,844**	**260,195**	**520,389**	**4,677**	**476,230**	**466,268**

Tabla D74

RESULTADOS DISIPACIÓN DE ENERGÍA										
TEMPERATURA MEDIA, TAMAÑO DE GRANO FINO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN NOMINAL 4,0 [%]										
Nº Ciclo	Coeficientes de amortiguamiento			Área de las Curvas experimentales				Energía	Módulos	
	B1	B2	B3	Total	Envolvente	Triangular	Rectangular	Disipada	Elástico	Secante
	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[]	[MPa]	[MPa]
1	14,381	4,845	7,191	131,530	432,050	291,123	582,246	22,590	447,697	442,568
2	3,178	1,064	1,589	29,114	435,457	291,658	583,315	4,991	443,860	437,260
3	3,137	1,061	1,568	28,790	432,053	292,163	584,326	4,927	443,860	436,504
4	3,054	1,036	1,527	27,907	428,662	290,900	581,800	4,797	445,004	438,398
5	3,018	1,023	1,509	27,485	427,576	289,890	579,780	4,741	446,154	439,926
6	3,036	1,032	1,518	27,526	424,467	288,639	577,277	4,768	445,795	440,325
7	3,005	1,018	1,502	27,081	423,278	286,886	573,772	4,720	447,725	441,499
8	2,942	0,998	1,471	26,400	421,214	285,650	571,301	4,621	445,867	440,370
PROMEDIO	**4,469**	**1,510**	**2,234**	**40,729**	**428,095**	**289,614**	**579,227**	**7,019**	**445,745**	**439,606**