



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**COMPORTAMIENTO SUPERELÁSTICO DE UNA ALEACIÓN  
Cu-11.8 %p.Al-0.5 %p.Be, PARA APLICACIONES EN INGENIERÍA  
ANTISÍSMICA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**MARCO BERNABÉ MARIVIL HUILIPÁN**

**PROFESOR GUÍA:  
AQUILES SEPÚLVEDA OSSES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MARÍA OFELIA MORONI YADLIN  
RODRIGO PALMA HILLERNS**

**SANTIAGO DE CHILE  
ABRIL 2007**

# *Agradecimientos*

*Al momento que escribo estas líneas estoy culminando el largo y laborioso proceso de mi formación profesional y se me vienen a la mente todos los momentos importantes que han transcurrido durante estos años, comienzo a recordar rostros, personas que estuvieron a mi lado, que se alegraban cuando tenía logros, que me daban ánimo cuando tenía una derrota, en fin aquellos que siempre estuvieron allí, en las buenas y en las malas.*

*Les agradezco a mis Hermanos, Hermanas y mis Padres todo ese inmenso apoyo que siempre me brindaron.*

*Agradezco a mis amigos por su apoyo y confianza que de una u otra forma me dieron.*

*Agradezco el apoyo y las valiosas indicaciones que me dieron mis profesores y que fueron vitales para culminar mi trabajo de memoria.*

*Agradezco a Dios que siempre me ha ayudado.*

*Dedico este trabajo en forma muy especial a mi hijo Fabriciano y a su madre Pilar, que comprendieron la importancia de éste y entendieron mis ausencias.*

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Antecedentes Generales . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	3
1.2.1. Objetivo general . . . . .	3
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	3
1.3. Alcances . . . . .	4
1.4. Motivación . . . . .	4
<b>2. Antecedentes Bibliográficos</b>	<b>6</b>
2.1. Aleaciones con Memoria de Forma y la Transformación Martensítica . . . . .	6
2.2. Rangos de Temperatura en que se Observa el ES . . . . .	7
2.3. Consideraciones de Composición . . . . .	9
2.4. AMF's más Utilizadas . . . . .	9
2.5. Características de la Curva Esfuerzo-Deformación . . . . .	10
<b>3. Procedimiento Experimental</b>	<b>12</b>
3.1. Introducción . . . . .	12
3.2. Tratamientos Térmicos y Metalografías . . . . .	13
3.2.1. Equipo utilizado . . . . .	13
3.2.2. Cantidad y dimensiones de las probetas a preparar . . . . .	13
3.2.3. Tratamientos térmicos . . . . .	14
3.2.4. Metalografías . . . . .	15
3.3. Ensayos Mecánicos . . . . .	18
3.3.1. Descripción general de la máquina de ensayos . . . . .	18

3.3.2.	Sistema de cabezales para montar la probeta . . . . .	19
3.3.3.	Sistema de Excentricas para ajuste de la carrera del cabezal móvil . .	19
3.3.4.	Sistema térmico . . . . .	22
3.3.5.	Sistema de adquisición de datos . . . . .	23
3.3.6.	Procedimiento para realizar un ensayo de tracción a la fractura . . . .	31
3.3.7.	Procedimiento para realizar un ensayo cíclico . . . . .	33
<b>4.</b>	<b>Resultados Experimentales</b>	<b>36</b>
4.1.	Tratamientos Térmicos y Caracterización de la Microestructura . . . . .	36
4.2.	Procedimiento de Análisis de los Registros de Datos Obtenidos . . . . .	44
4.2.1.	Modificación de los registros . . . . .	44
4.2.2.	Parámetros que se calculan en las curvas de tracción . . . . .	46
4.2.3.	Parámetros que se calculan en las curvas cíclicas . . . . .	47
4.2.4.	Estructura general de los registros . . . . .	49
4.3.	Ensayos a la Fractura . . . . .	53
4.3.1.	Ensayos de probetas de Acero y Cobre . . . . .	53
4.3.2.	Repetición del ensayo a 20 °C con probeta de 60 $\mu\text{m}$ , realizado por C. Mir . . . . .	56
4.3.3.	Ensayos a 50 °C con probetas de 60, 100 y 200 $\mu\text{m}$ . . . . .	58
4.3.4.	Repetibilidad de los ensayos a la fractura utilizando material de aleación.	60
4.3.5.	Análisis del conjunto completo de curvas tracción . . . . .	66
4.3.6.	Ensayos de probetas previamente cicladas . . . . .	71
4.4.	Ensayos Cíclicos . . . . .	79
4.4.1.	Repetición del ensayo a 2.2% deformación, con probeta de 200 $\mu\text{m}$ y temperatura variable, realizado por C. Mir. . . . .	79
4.4.2.	Ensayos a 25 °C, con probeta de 115 $\mu\text{m}$ y con deformación variable .	86
4.4.3.	Ensayos a tamaños de granos y temperaturas fijas, con deformación variable . . . . .	89
4.4.4.	Influencia de la frecuencia de ciclado . . . . .	111
4.4.5.	Ensayos a igual velocidad promedio . . . . .	115
4.5.	Metalografías Post-Ensayos . . . . .	118

<b>5. Conclusiones</b>	<b>123</b>
5.1. Ensayos a la Fractura . . . . .	123
5.2. Ensayos Cíclicos . . . . .	125
<b>Bibliografía</b>	<b>127</b>
<b>A. Intervalo de confianza para la media poblacional <math>\mu</math></b>	<b>129</b>
<b>B. Códigos de funciones Matlab utilizados</b>	<b>131</b>

# Simbología

AMF: Aleación con memoria de forma.

EMF: Efecto de memoria de forma.

ES: Efecto de superelasticidad.

TM: Transformación martensítica.

$M_s$ : Temperatura a la cual comienza a formarse martensita.

$M_f$ : Temperatura a la cual termina la formación de martensita.

$A_s$ : Temperatura a la cual comienza a formarse austenita.

$A_f$ : Temperatura a la cual termina la formación de austenita.

$M_d$ : Temperatura máxima a la cual la transformación martensítica se puede inducir por aplicación de esfuerzos.

MIF: Martensita inducida por esfuerzos.

MLI: Método de la línea interceptada.

I.C.: Intervalo de confianza.

$S_t$ : Esfuerzo de transformación.

E: Módulo de elasticidad austenítico.

P: Pendiente del Plateau.

R: Rigidez secante del ciclo.

UTS: Esfuerzo a la fractura.

$e_{UTS}$ : Deformación a la fractura.

$S_{ls}$ : Esfuerzo máximo del ciclo.

$e_{ls}$ : Deformación máxima del ciclo.

$A_s$ : Área bajo la recta secante del ciclo.

$A_t$ : Área bajo la curva de tracción del ciclo.

$A_d$ : Área del ciclo.

$\xi_{DesRoches}$ : Factor de amortiguamiento de DesRoches.

$\xi_{Chopra}$ : Factor de amortiguamiento de Chopra.

$d$ : Tamaño de grano.

$\bar{d}$ : Tamaño de grano promedio.

$S_{n-1}$ : Desviación estándar del tamaño de grano promedio.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes Generales

Existe una gama de materiales que presentan un comportamiento llamado *Memoria de forma*. Una de las principales características de estos materiales es que pueden ser deformados más allá de su límite elástico convencional y recuperar su forma original, ya sea a través de un tratamiento térmico adecuado o directamente al retirar la carga que los deformó (Superelasticidad) [4], además, en ciclos de carga y descarga, las aleaciones superelásticas disipan energía en cada ciclo. Este comportamiento de disipación y la capacidad de aceptar grandes deformaciones recuperables, permite ver la potencialidad de estos materiales de actuar como disipadores pasivos de energía en estructuras civiles, aplicación que se enmarca dentro del campo de la ingeniería antisísmica.

Una aleación, cuyo comportamiento superelástico ya ha sido probado en trabajos anteriores [1][3], es la aleación Cu-11.8%pAl-0.5%pBe. Con miras hacia futuras aplicaciones como disipador sísmico, en este trabajo se debe observar su comportamiento mecánico bajo condiciones de temperatura y frecuencia dentro de los rangos en que se dan los sismos que afectan a las construcciones civiles (-10 a +50°C y 0,2 a 5 Hz). Con este propósito se realizaron ensayos de tracción tradicional (monotónicos a la fractura) y cíclicos, en una máquina disponible en el Departamento de Ingeniería Civil.

Los parámetros que se consideraron en los ensayos cíclicos son: tamaño de grano austenítico, temperatura, frecuencia y amplitud de oscilación. En los ensayos monotónicos las variables

consideradas fueron: tamaño de grano y temperatura.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de esta memoria es estudiar el comportamiento superelástico de la aleación Cu-11.8%pAl-0.5%pBe, bajo distintas condiciones de temperatura, microestructura, amplitud y frecuencia de oscilación, dentro del rango en que se dan los sismos (0.2 a 5 Hz y -10 a 50 °C).

### 1.2.2. Objetivos específicos

1. En ensayos de tracción monotónicos a la fractura, para distintas temperaturas y tamaños de grano, se debe determinar el comportamiento del material en términos de: esfuerzo de transformación, deformación y carga de ruptura.
2. En ensayos de tracción cíclicos, se debe estudiar el efecto del tamaño de grano, temperatura, amplitud y frecuencia de oscilación, sobre el comportamiento de la aleación.
3. Se debe completar y verificar información experimental obtenida recientemente en una memoria realizada por C. Mir [1].
4. Sobre la base de un conjunto de datos más completo y confiable se debe realizar un análisis global de la información disponible, procurando establecer relaciones estructura-propiedades.

Inicialmente en el trabajo de C. Mir, se planteó la idea de obtener resultados experimentales para la matriz de parámetros que se observa en la tabla 1.1. Se pretendía realizar ensayos de tracción monotónico a la fractura (TM) y ensayos de tracción cíclicos (TC), para probetas de aleación, en que los parámetros que se variaban eran el tamaño de grano  $d$  (60, 100 y 200  $\mu\text{m}$ ) y la temperatura  $T$  (6, 25 y 50 °C). Además en los ensayos cíclicos se variaba la amplitud de oscilación.

Tabla 1.1: Matriz de datos a completar.

Temperatura [°C]	Tamaño de grano [ $\mu\text{m}$ ]		
	60	100	200
6	T.M.	T.M.	T.M.
	T.C.	T.C.	T.C.
25	T.M.*	T.M.*	T.M.*
	T.C.	T.C.	T.C.
50			
	T.C	T.C.	T.C.

\* se realizaron a 20 °C

Como se puede observar, la obtención de datos experimentales para esta matriz de parámetros no está completa y parte de los objetivos de este trabajo de memoria fue completarlos.

### 1.3. Alcances

Los ensayos a la fractura se realizaron con probetas de tamaños de grano de 60, 100, 115 y 200  $\mu\text{m}$ , a temperaturas de 6, 20 y 50 °C. Los ensayos cíclicos se realizaron con probetas de tamaños de grano de 60, 100, 115 y 200  $\mu\text{m}$ , a temperaturas de 6, 25 y 50 °C, con deformaciones nominales (amplitud de oscilación) de 0.8, 1.5 y 2.2 % y a frecuencias que van desde 0.01 a 1 Hz.

El material de aleación que se utilizó es de tipo comercial y se encontraba en forma de alambre de 0.5 mm de diámetro.

### 1.4. Motivación

Tanto en Chile como a nivel mundial se observa que las normas de construcción en altura tienden a ser cada vez más exigentes, lo cual persigue asegurar que las estructuras tengan una mejor respuesta ante eventuales movimientos sísmicos. Esta tendencia no sólo se observa en construcciones de altura, sino que también en estructuras civiles de otro tipo, tales como puentes y carreteras.

Existen determinadas construcciones que es necesario mantenerlas funcionando a como de lugar, a pesar de la ocurrencia de un sismo de alta intensidad, ya que las pérdidas económicas

(o de otra índole) en que se incurre ante su eventual falla, son cuantiosas. Ejemplo de esto son laboratorios y hospitales que generalmente mantienen equipos de alto valor económico en su interior. También se pueden mencionar construcciones que tienen un alto valor histórico como monumentos nacionales o museos. En esta perspectiva se entiende que es necesario mejorar y/o utilizar nuevas y efectivas técnicas de construcción, que permitan a la estructura soportar sismos de alta intensidad y retener un daño mínimo.

Con el uso de las llamadas *Aleaciones con Memoria de Forma (AMF)* se vislumbran potenciales nuevas tecnologías de construcción. Estas aleaciones tienen la capacidad de disipar energía en ciclos de carga y descarga (capacidad de amortiguamiento), fenómeno que hace ver una posible aplicación de estos materiales como disipadores pasivos de energía en estructuras civiles.

Este trabajo se encuentra dentro del marco de una extensa línea investigativa tendiente a caracterizar aleaciones base cobre que exhiben el comportamiento superelástico. Se espera que en el futuro esta investigación decante en el desarrollo de una aleación base Cu que sea aplicable como efectivo disipador de energía sísmica.

## Capítulo 2

# Antecedentes Bibliográficos

### 2.1. Aleaciones con Memoria de Forma y la Transformación Martensítica

Las Aleaciones con Memoria de Forma se caracterizan por presentar dos propiedades únicas: el *Efecto de Memoria de Forma (EMF)* y el *Efecto de Superelasticidad (ES)* [4]. Ambas propiedades están relacionadas con la *Transformación Martensítica (TM)*, por lo tanto una condición necesaria de las AMF's es que exhiban la TM.

La TM es una transformación de fase en sólidos que ocurre sin difusión y a grandes velocidades (del orden de la velocidad del sonido), existe sólo un movimiento pequeño de los átomos (del orden de las fracciones de las distancias interatómicas) y frecuentemente es producida por mecanismos de corte [4]. Involucra una fase madre austenita ( $\beta$ ) de alta simetría a alta temperatura y una fase metaestable martensita de baja simetría a baja temperatura. Al producirse la TM se introducen esfuerzos internos en la matriz del material.

En la TM, inicialmente se tiene austenita estable a alta temperatura. Al enfriar rápidamente, bajo una cierta temperatura crítica llamada  $M_s$  (martensita start), la austenita se torna inestable y comienza a formarse martensita metaestable. Si se continúa enfriando, existe otra temperatura llamada  $M_f$  (martensita finish), bajo la cual toda la austenita se transforma a martensita metaestable. Análogamente, en la TM inversa, inicialmente se tiene martensita metaestable y al comenzar a calentar por sobre la temperatura llamada  $A_s$  (austenita start), ésta se torna inestable y comienza a formarse austenita, proceso que se

completa al alcanzar la temperatura  $A_f$  (austenita finish), donde toda la martensita presente se habrá transformado a austenita.

El EMF está relacionado con la TM inversa, es decir el material deformado recupera su forma original al aplicar un tratamiento térmico adecuado. En la figura 2.1 se muestra el EMF en una antena de aire construida con cables de Nitinol (aleación Ti-Ni), la cual es deformada hasta el estado martensítico y luego recupera su forma por medio de calentamiento solar [4].

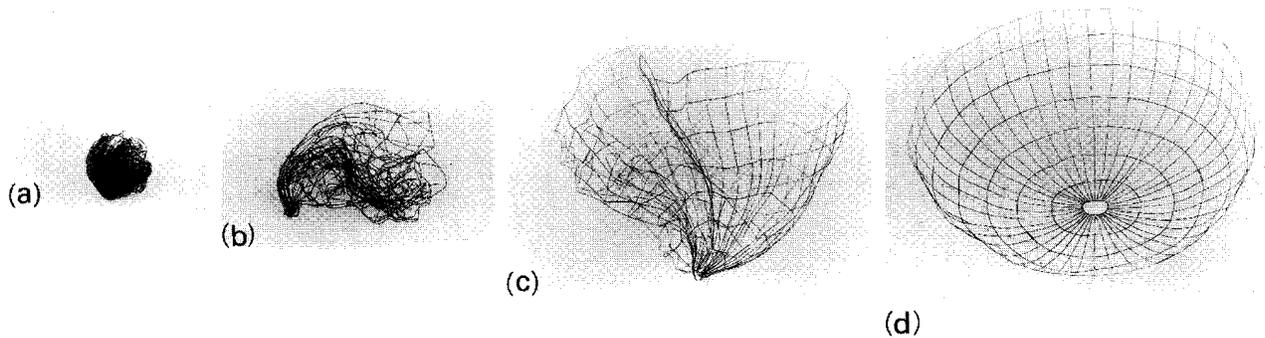


Figura 2.1: Demostración del EMF en una antena de aire construida de cables de Ti-Ni. La antena deformada, en estado martensítico (a), recupera su forma original (b-d) por medio de calentamiento solar.

Anteriormente se describió la TM directa en términos de enfriamiento rápido desde la fase  $\beta$  estable a alta temperatura hasta la formación de martensita metaestable a baja temperatura y se dijo que durante el proceso sólo se produce un movimiento pequeño de los átomos o reacomodo local y se introducen esfuerzos internos en la matriz. Considerando estas últimas características, se puede esperar que por medio de aplicación de esfuerzos externos al material también se pueda inducir la TM. Esto efectivamente es así y la variante de martensita obtenida se le llama *Martensita Inducida por Esfuerzos (MIF)*, la cual es generada a través de la deformación del material. La superelasticidad o ES tiene su origen en esta transformación y el material recupera su forma original al retirar la carga que lo deformó.

## 2.2. Rangos de Temperatura en que se Observa el ES

Existe una temperatura llamada  $M_d$ , que es la temperatura máxima bajo la cual la TM se puede inducir por esfuerzos. A temperaturas por sobre  $M_d$ , al aplicar carga más allá del

límite elástico convencional sólo se producirá deformación plástica. Este fenómeno se debe a que por sobre  $M_d$  la fase austenítica se torna estable. Se cumple que  $M_f < M_s < A_f < M_d$  [3].

Para observar el ES se requiere que la aleación se encuentre en fase austenítica metaestable a la temperatura de trabajo y que esta temperatura sea ligeramente superior a  $A_f$  y menor que  $M_d$ . El rango de temperatura en que normalmente funcionan las estructuras civiles es aproximadamente -10 a 50 °C, por cuanto el hecho de poder manejar las temperaturas críticas de forma que se ajusten a estos rangos es muy importante.

En el sistema binario Cu-Al las temperaturas críticas observadas son demasiado altas, por ejemplo  $M_s$  está alrededor de 480 °C [3]. Se ha observado que al adicionar Be en pequeñas cantidades, estas temperaturas bajan, de hecho, el principal efecto de adicionar Al y Be en la aleación ternaria Cu-Al-Be es bajar la temperatura  $M_s$  (el efecto del Be es mucho más fuerte), lo cual se ve reflejado en las ecuaciones obtenidas empíricamente por Belkhala (ec. 2.1) e Higuchi (ec. 2.2).

$$M_s = 1245 - 71 (\%pAl) - 893 (\%pBe) \quad (2.1)$$

$$M_s = 638 - 43 (\%pAl) - 302 (\%pBe) \quad (2.2)$$

Aunque el principal factor que controla el valor que presentan las temperaturas de transformación de fase es la composición, otros factores tales como el tratamiento térmico empleado, la velocidad de temple, los tiempos y temperaturas de envejecimiento y el tamaño de grano también las afectan.

Los valores de temperaturas informados por el fabricante, para la aleación Cu-11.8 %pAl-0.5 %pBe son:  $M_s = -18$  °C,  $M_f = -47$  °C,  $A_s = -20$  °C y  $A_f = 2$  °C. Estas temperaturas fueron medidas por S. Montecinos [3] a través de DSC, encontrándose los siguientes valores:  $M_s = -5$  °C,  $A_s = -9$  °C y  $A_f = -4$  °C, en alambres de 3 mm de diámetro y  $A_s = -12.38$  °C, en alambres de 5.6 mm de diámetro.

## 2.3. Consideraciones de Composición

Para el sistema ternario Cu-Al-Be se establecen ciertos rangos de composición en los cuales se puede lograr que una aleación presente ES. En la figura 2.2 se muestra el diagrama ternario de composiciones. Se tiene que para composiciones dentro del polígono ACEFA es observable el ES, pero dentro de este rango se reconocen mejores resultados para aleaciones con composición dentro del polígono BCDGHB. La fijación de los límites de composición se explica de acuerdo a los siguientes puntos.

- Fuera del segmento AF es prácticamente imposible lograr un valor de  $M_s$  de  $-200\text{ }^\circ\text{C}$  o menor.
- Fuera del segmento AC y EF, la aleación no presenta una fase única de tipo austenita.
- Fuera del segmento CE el efecto de memoria de forma no se produce.

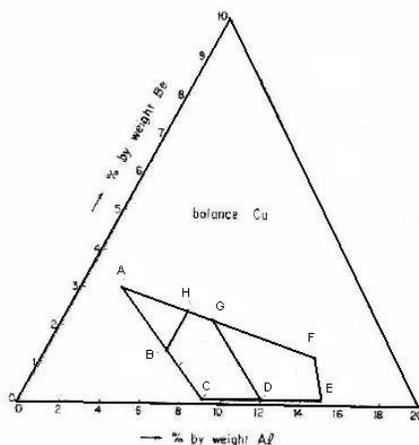


Figura 2.2: Sistema ternario Cu-Al-Be.

## 2.4. AMF's más Utilizadas

Las primeras observaciones de una AMF fueron realizadas en el año 1951, por Chang y Read, en una aleación Au-47.5at %Cd, pero no fue sino hasta 1963 que se descubrieron las aleaciones Ni-Ti (Nitinol) [4], las más ampliamente usadas en la actualidad para diversas aplicaciones industriales. También se ha observado el efecto de memoria de forma en aleaciones de cobre, basadas en los sistemas binarios Cu-Zn y Cu-Al.

Las aleaciones de Nitinol presentan buenas propiedades en términos de esfuerzos, ductilidad, resistencia a la corrosión y soportan gran cantidad de ciclos de carga y descarga, además presentan excelentes características de EMF, sin embargo son de alto costo y difícil maquinación. Las AMF's basadas en el sistema binario Cu-Al presentan buenas perspectivas: tienen bajos costos, buenas propiedades de conducción eléctrica y térmica y son de fácil maquinación, además han sido objetos de diversos estudios y han experimentado un gran desarrollo [4].

## 2.5. Características de la Curva Esfuerzo-Deformación

Las aleaciones superelásticas disipan energía en ciclos de carga y descarga, lo cual está asociado al fenómeno de *fricción interna*, que a su vez está relacionado con la histéresis del material. Este fenómeno de fricción interna no es aún bien comprendido, pero se acepta generalmente que el amortiguamiento no lineal observado se relaciona con el movimiento reversible de las interfaces entre las diferentes variantes de martensita. El amortiguamiento de una aleación SE se ve reflejado en la figura 2.3, donde se presenta una curva esfuerzo-deformación típica en un ciclo de carga y descarga de una probeta sometida a tracción.

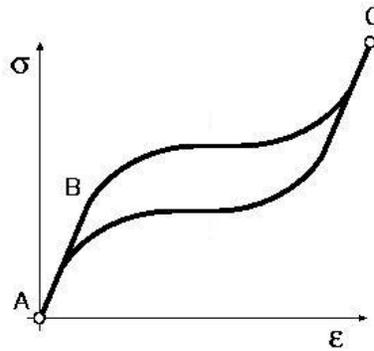


Figura 2.3: Ciclo de histéresis de un material con ES.

El cambio de fase comienza con la formación del plateau (punto B) y se mantiene hasta que toda la austenita presente se transforme en martensita (punto C). Al descargar, la martensita se torna inestable y ocurre la transformación inversa (curva inferior C-A). Al completarse esta transformación, el material retoma las características elásticas de la austenita. Al llegar a un nivel de esfuerzo nulo (punto A) el material queda sin deformación remanente.

Como resultado, hay disipación de energía asociada al ciclo de carga y descarga (ciclo de histéresis). La energía disipada está relacionada con el área encerrada por el ciclo. Es esta energía que se disipa en ciclos de carga y descarga la que permite vislumbrar la aplicación de aleaciones con ES como disipadores en estructuras civiles. Para ello, es de vital importancia verificar el buen comportamiento mecánico de la aleación.

## Capítulo 3

# Procedimiento Experimental

### 3.1. Introducción

En este capítulo se presenta una descripción en detalle del procedimiento experimental utilizado en el desarrollo de este trabajo de memoria.

El material fue tratado térmicamente a alta temperatura, seguido de un temple en agua a 0 °C, lo que permitió retener austenita metaestable (recordar que  $M_s = -5$  °C), lo cual es una condición necesaria para observar el ES. Luego del templado se aplicó un envejecimiento en agua a 100 °C durante 24 horas, con el propósito de eliminar tensiones producidas por el templado. Usando diferentes tiempos de tratamiento a alta temperatura se pudo obtener diferentes tamaños de grano.

Posterior a los tratamientos, el material fue ensayado en tracción monotónica a la fractura y en tracción cíclica. Los ensayos en tracción monotónica se realizaron a diferentes temperaturas y utilizando probetas con distintos tamaños de grano. Los ensayos de tracción cíclicos se realizaron a diferentes temperaturas, amplitudes y frecuencia de oscilación, utilizando probetas con diferentes tamaños de grano.

## **3.2. Tratamientos Térmicos y Metalografías**

### **3.2.1. Equipo utilizado**

Los tratamientos térmicos a alta temperatura se realizaron en las dependencias del Departamento de Ingeniería de Materiales. Las metalografías se realizaron en el Departamento de Ingeniería Mecánica (Taller de Molina). Los principales equipos y accesorios utilizados fueron:

1. Horno tubular de resistencia, marca Lindberg.
2. Medidor de temperatura digital y termocupla tipo k de largo 65 cm.
3. Cilindro de alúmina tapado en uno de sus extremos, de 5 cm de diámetro exterior, 6 mm de espesor y 25 cm de largo.
4. Cronómetro.
5. Guantes resistentes de alta temperatura.
6. Resina epóxica transparente para embutir en frío (Sikadur 52).
7. Pulidora eléctrica de disco, lijas al agua y paño de alúmina.
8. Microscopio óptico y cámara digital.
9. Secador de pelo.
10. Reactivos metalográficos.

### **3.2.2. Cantidad y dimensiones de las probetas a preparar**

Se cortaron 30 probetas de 9 cm de largo. De esta cantidad, 10 se trataron térmicamente con el propósito de obtener una microestructura de tamaño de grano aproximado a  $60 \mu\text{m}$ , otras 10 apuntaron a obtener un tamaño de grano de  $100 \mu\text{m}$  y las 10 restantes a obtener un tamaño de grano de  $200 \mu\text{m}$ . La dimensión de 9 cm de largo de las probetas fue elegida con el propósito de tener un largo útil de 7 cm entre mordazas, dejando 1 cm a cada lado para el agarre.

Debe mencionarse que también se dispone de 5 probetas con tamaño de grano  $60 \mu\text{m}$ , 4 de  $100 \mu\text{m}$  y 5 de  $200 \mu\text{m}$ , preparadas por C. Mir. Todas tienen un largo de 90 mm.

### 3.2.3. Tratamientos térmicos

El horno tubular utilizado tiene un largo de 108 cm y una bobina calefactora central, por lo que presenta un gradiente de temperatura. Para una temperatura nominal de  $705 \text{ }^\circ\text{C}$  el perfil de temperatura que presentó en la zona donde se ubican las probetas, es el que se muestra en la figura 3.1.

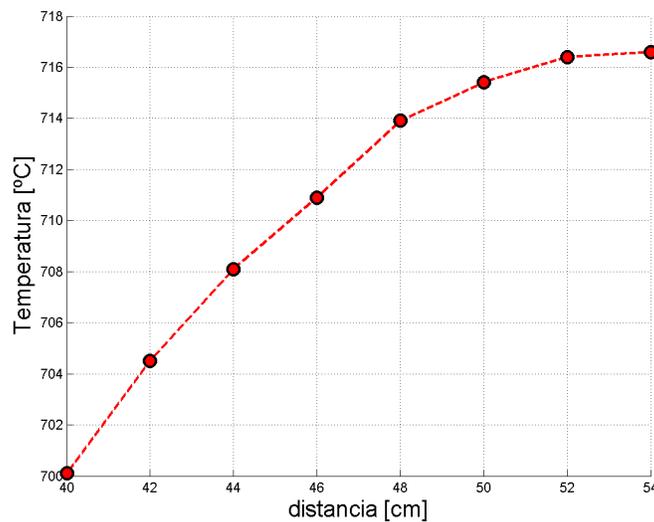


Figura 3.1: Perfil de temperatura en el horno para una temperatura nominal de  $705 \text{ }^\circ\text{C}$ .

De acuerdo al trabajo experimental de C. Mir <sup>[1]</sup>, se definió la temperatura y los tiempos de permanencia de las probetas dentro del horno, para obtener un determinado tamaño de grano. En el trabajo mencionado se definieron tiempos de: 20 s a  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  para obtener un tamaño de grano nominal de  $60 \mu\text{m}$ , 30 s a  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  para obtener un tamaño de grano nominal de  $100 \mu\text{m}$  y 180 s a  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  para obtener un tamaño de grano nominal de  $200 \mu\text{m}$ . Los tiempos y temperaturas utilizados en este trabajo se basaron en esos antecedentes.

En base a los antecedentes anteriores el procedimiento aplicado fue el siguiente:

1. Se estableció una temperatura nominal en el horno de  $705 \text{ }^\circ\text{C}$  y se esperó a que se estableciera un régimen estacionario ( $\approx 30$  minutos).

2. Se introdujo el cilindro de alúmina hasta el centro del horno de tal forma que estuviera sometido al perfil de temperatura de la figura 3.1. Se esperó a que el cilindro adquiriera la temperatura del horno ( $\approx 35$  minutos).
3. Se acercó el cilindro de alúmina a la entrada del horno y se introdujeron 5 probetas en el fondo de éste. Posteriormente se volvió a dejar el cilindro en la misma posición central.
4. Se hicieron 2 horneadas para un tiempo de permanencia de 20 s, 2 horneadas para un tiempo de 30 s y 2 horneadas para un tiempo de 180 s.
5. Después del tiempo de permanencia en el horno se procedió a un temple en agua con hielo. Para ello el procedimiento fue: se acercó rápidamente el cilindro a la entrada y se dejaron caer las probetas en un recipiente que contenía agua con hielo y se mantuvieron ahí durante 60 s.
6. Finalmente se aplicó un envejecimiento en agua a 100 °C durante 24 horas.

Se utilizó una temperatura nominal de 705 °C debido a que el cilindro de alúmina utilizado en este trabajo, es de mayores dimensiones que aquel utilizado por C. Mir, por lo que el precalentamiento del mismo era mayor.

El envejecimiento en agua a 100 °C, se realizó artesanalmente en una tetera. Las probetas se mantuvieron en agua hirviendo, durante 24 hrs y cada cierto tiempo se reponía agua para compensar la evaporación.

#### **3.2.4. Metalografías**

Como en cada horneada se introducían 5 probetas, el procedimiento aplicado fue elegir al azar una probeta de cada horneada y sacar muestras de 2 cm de su parte central y de sus extremos. Estas muestras se embutieron en frío en Bakelita transparente. El objetivo de embutir en frío es evitar que las probetas tratadas sean sometidas al aumento de temperatura que significa el embutido en caliente, aumento que puede afectar los tratamientos térmicos realizados.

Una vez embutidas las muestras, se realizó un *proceso de pulido* con una serie de lijas al agua de mallas: 400, 600, 1000 y 1200. Finalmente se aplicaron paños con alúmina, de 0.3 y 0.05  $\mu\text{m}$ , disuelta en agua destilada.

Luego del pulido se realizó un *ataque metalográfico* cuya composición es: Alcohol (80 ml), Ácido Clorhídrico (20 ml) y Cloruro Férrico (1.5 g). Este ataque permitió definir los bordes de grano de las muestras. El procedimiento para realizar el ataque fue el siguiente: se calentó la muestra con aire caliente, se empapó con ataque entre 1 y 3 segundos, transcurrido este tiempo se neutralizó el ataque enjuagando en abundante agua destilada. Finalmente las muestras eran secadas para observarlas en el Microscopio Óptico.

La *determinación del tamaño de grano* se realizó de dos formas. La primera consistió en medir directamente el largo de los granos orientados longitudinalmente en la probeta. Para ello se trazaron líneas en fotografías (con aumento de 50x) obtenidas con el microscopio óptico. Las líneas se orientaron longitudinalmente y se usaron fotografías de la parte central y de los extremos de la probeta. En cada línea se midió el largo de cada grano interceptado, utilizando para ello una reglilla fotografiada con el mismo aumento. En cada probeta se tomaron por sobre 29 mediciones de grano, por lo que se podrá realizar un análisis estadístico del tamaño de grano. La segunda forma utilizada para determinar el tamaño de grano fue el método de la línea interceptada que se describe a continuación.

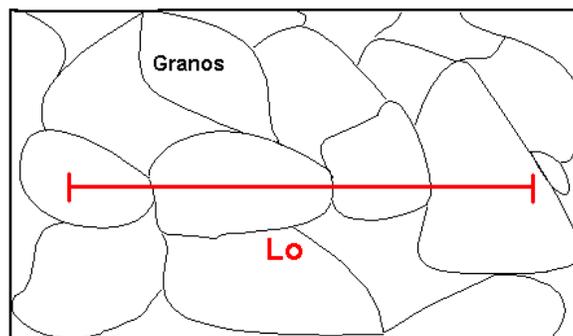


Figura 3.2: Esquema de medición de grano a través de Método de la Línea Interceptada.

Un esquema del *Método de la Línea Interceptada (MLI)*, se presenta en la figura 3.2.

El MLI consiste en trazar una línea de una longitud conocida  $L_o$  sobre la zona donde se quiere medir el tamaño de grano  $d$ , entonces el tamaño de grano viene dado por la expresión siguiente:

$$d = \frac{L_o}{N} \quad (3.1)$$

Donde  $N$  es el número de granos interceptados. Los granos del extremo de la línea se cuentan si se quiere subestimar el tamaño de grano, o en caso contrario no se cuentan y se estará sobrestimando el tamaño de grano. Es conveniente realizar más de una línea y sobre imágenes de distintas zonas de la probeta, para que el resultado tenga una mayor confiabilidad. Lo usual es realizar varias líneas verticales y horizontales y obtener el promedio global. El MLI es un método bastante utilizado por su sencillez y rapidez.

En este caso el procedimiento consistió en tomar cuatro imágenes de distintas zonas de la probeta y en cada una de ellas se trazó tres líneas horizontales y tres líneas verticales, como se observa en la figura 3.3, y se obtuvo el promedio global.

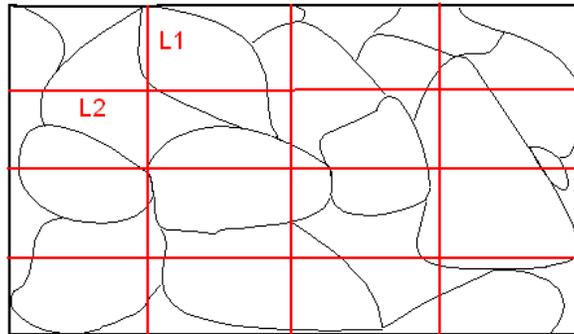


Figura 3.3: Forma en que se midió el grano utilizando MLI.

### 3.3. Ensayos Mecánicos

#### 3.3.1. Descripción general de la máquina de ensayos

Para realizar los ensayos mecánicos se utilizó la Máquina de Fatiga que se muestra en la figura 3.4, la cual se encuentra en el Laboratorio de Dinámica Estructural del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Está máquina fue inicialmente diseñada y construida por R. Herrera [6].



Figura 3.4: Máquina utilizada en los ensayos mecánicos.

El motor es alimentado por una fuente DC de voltaje variable (figura 3.5) que permite variar la frecuencia.



Figura 3.5: Fuente DC de voltaje variable.

Los principales componentes y sistemas que utiliza la máquina son: para montar la probeta cuenta con un *Sistema de dos cabezales*, uno fijo y otro móvil, los cuales tienen adaptado un sistema de mordazas, la fuente DC de voltaje variable permite imponer frecuencias de oscilación del cabezal móvil que van desde 0 a 1 Hz; un *Sistema de ruedas excéntricas* que permite imponer las amplitudes de oscilación del cabezal móvil; un *Sistema térmico* que permite imponer una determinada temperatura de ensayo, un *Sistema de adquisición de datos* que permite obtener mediciones de fuerza, desplazamiento y temperatura en la probeta.

### 3.3.2. Sistema de cabezales para montar la probeta

Consta de dos cabezales, uno fijo y otro móvil (figura 3.6), que tienen adaptado un sistema de mordazas tipo taladro en donde se monta la probeta. Cuando la probeta se encuentra montada, el cabezal fijo permite aplicar una *pretensión* a través del ajuste de sus tuercas. El cabezal móvil va unido a un carro deslizante (figura 3.4 y 3.8 a)) y éste a su vez va conectado al sistema de excéntricas, el cual a través de un sistema de transmisión es impulsado por el motor. La frecuencia de oscilación del cabezal móvil se puede variar a través de la fuente DC de voltaje variable del motor (figura 3.5). La carrera o amplitud de oscilación del cabezal móvil se impone ajustando el sistema de ruedas excéntricas que a continuación se describe.

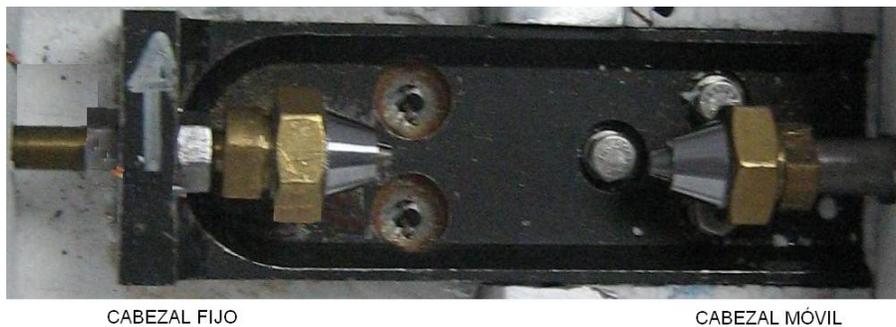


Figura 3.6: Cabezal fijo y cabezal móvil.

### 3.3.3. Sistema de Excentricas para ajuste de la carrera del cabezal móvil

La amplitud de oscilación del cabezal móvil es variable y se puede ajustar a través de un sistema de ruedas excéntricas con que cuenta la máquina [6]. El sistema consiste de una excéntrica superior y una excéntrica inferior, ambas con una determinada configuración de perforaciones como se muestra en la figura 3.7. Al hacer coincidir una perforación de la rueda

superior con una de la rueda inferior se tiene una determinada amplitud de oscilación del cabezal móvil.

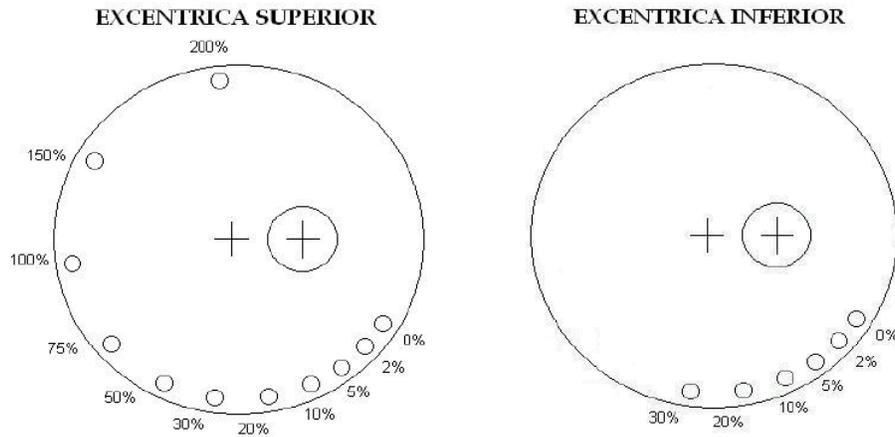


Figura 3.7: Sistema de excéntricas que permiten ajustar la amplitud de oscilación entre cabezales.

En el trabajo de C. Mir se determinó la carrera del cabezal móvil para 36 combinaciones de perforaciones. En la tabla 3.4 se presentan las amplitudes de oscilación medidas para cuatro combinaciones, que corresponden a las que se usarán en este trabajo. Para medir las carreras, C. Mir utilizó un Dial Mecánico análogo y consideró un largo entre mordazas de 70 mm. En la tabla 3.2 se presentan mediciones hechas en este trabajo de memoria, para lo cual se utilizó un Dial Mecánico digital (figura 3.8) y un largo entre mordazas de 70 mm. El dial se ubica en un extremo del carro deslizante y moviendo manualmente el eje que sale del motor se busca el punto de mínima distancia entre los dos cabezales, lo cual se detecta observando la posición en el dial. Ubicado este punto, se setea el dial mecánico en cero y se gira nuevamente el eje hasta alcanzar el punto más alejado de la carrera del cabezal móvil, lo cual se detecta mirando la posición en el dial.



Figura 3.8: Dial mecánico: a) forma en que va montado; b) vista superior.

Tabla 3.1: Mediciones hechas en el trabajo de C. mir.

Perforación		Carrera total cabezal móvil [mm]	Deformación probeta Lo=70 mm [%]
Superior	Inferior		
5 %	5 %	0,56	0,8
5 %	10 %	1,05	1,5
2 %	5 %	1,53	2,2
30 %	0 %	12,8	18,3

Tabla 3.2: Mediciones hechas en este trabajo.

Perforación		Carrera total cabezal móvil [mm]	Deformación probeta Lo=70 mm [%]
Superior	Inferior		
5 %	5 %	0,43	0,6
5 %	10 %	1,11	1,6
2 %	5 %	1,73	2,5
30 %	0 %	12,62	18,0

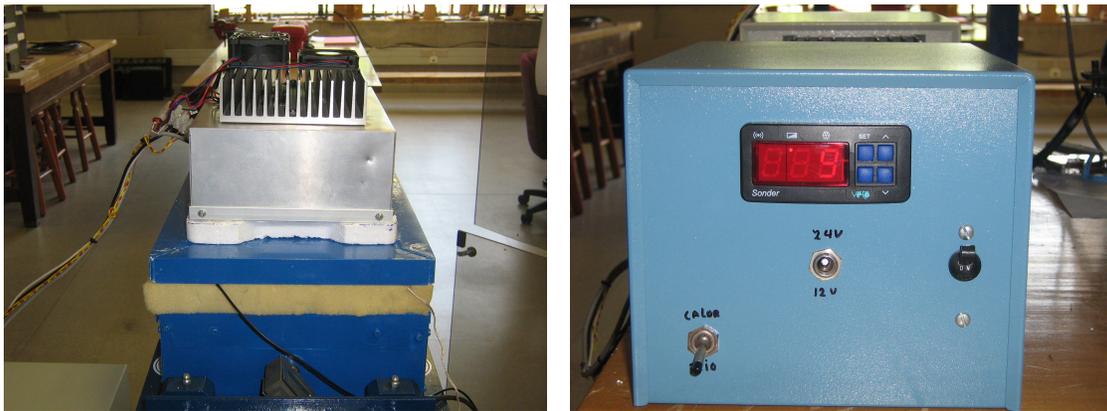
Se pueden observar algunas diferencias en ambas mediciones, sin embargo se optará por asignar como deformaciones nominales aquellas utilizadas por C. Mir, es decir: 0.8, 1.5, 2.2 y 18.3%. Se debe tener presente que la combinación de 30% en la excéntrica superior y 0% en la inferior corresponde a la máxima carrera que puede alcanzar el cabezal móvil y por lo tanto esta combinación se utiliza en los ensayos a la fractura, ya que asegura el rompimiento de la probeta. Las otras tres combinaciones se utilizan en los ensayos cíclicos. La elección de

ellas se hizo teniendo en consideración que la probeta no supere el rango superelástico que se considera alrededor dentro del rango de 2 a 3%.

### 3.3.4. Sistema térmico

Como se mencionó, la máquina cuenta con una *cámara térmica* construida en base a paneles de plumavit y aluminio (figura 3.9 a)). Esta cámara permite aislar la zona de ensayos.

Para adquirir las temperaturas nominales de ensayo que se utilizaron en este trabajo: 6, 25 y 50 °C, se requiere un *sistema de intercambio térmico* (figura 3.9 a), 3.10 a) y b)), el cual está diseñado en base a celdas Peltier [7] (cuyo funcionamiento se basa en el efecto Peltier [16]) que permiten enfriar o calentar la cámara al intercambiar la polaridad de la corriente. El sistema está construido con placas de aluminio y material aislante y en ambas caras se montaron intercambiadores de calor de aletas, además para mejorar el intercambio térmico, sobre cada intercambiador se montaron ventiladores (figura 3.10 a) y b)).

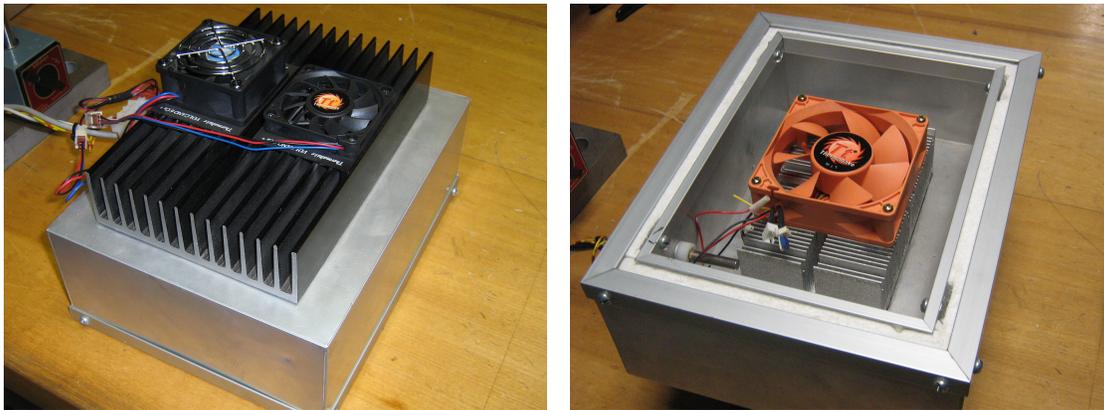


(a)

(b)

Figura 3.9: Sistema térmico: a) cámara y sistema de intercambio térmico; b) sistema de control.

El control de este sistema está a cargo de un *sistema de control* (figura 3.9 b)), que posee tres palancas de doble posición que permiten: encender y apagar el sistema (palanca encendido-apagado), invertir la polaridad de la corriente y así enfriar o calentar la región de ensayos (palanca calor-frío) y controlar la potencia de extracción, al cambiar el voltaje utilizado por el sistema (palanca 24-12 volts). Además, posee un panel digital que permite



(a)

(b)

Figura 3.10: Sistema de intercambio térmico: a) vista exterior; b) vista interior.

setear la temperatura que se desea adquirir dentro de la cámara. Para alcanzar la temperatura seteada, el sistema de control utiliza un *controlador* retroalimentado con las mediciones de temperatura entregadas por una termocupla ubicada en la parte interior, en un costado del intercambiador (figura 3.10 b)). Como esta termocupla está ubicada muy cerca del ventilador interior, sus mediciones no corresponden exactamente a los valores de temperatura que se observan en la zona entre mordazas, donde va ubicada la probeta. Debido a esto, C. Mir introdujo un sistema de sensores de temperatura que están ubicados en diversos sectores de la cámara, con el objeto de obtener mediciones de temperatura más precisas.

### 3.3.5. Sistema de adquisición de datos

Para medir la fuerza aplicada para traccionar la probeta se cuenta con una Celda de Carga o sensor de fuerza que está montado entre el cabezal móvil y el carro deslizante como se muestra en la figura 3.11 a). Para medir la deformación longitudinal de la probeta se cuenta con un Extensómetro marca MTS de 25 mm de abertura entre tenazas, que va montado directamente sobre la probeta como se muestra en la figura 3.11 b). Al montar el extensómetro sobre la probeta, ésta se deforma debido al peso de éste, por lo tanto, ésta es una primera razón para aplicar pretensión a la probeta. Una segunda razón para aplicar pretensión es que el extensómetro mide deformaciones negativas después del primer ciclo, cuando los cabezales están a la mínima distancia entre ellos, esto, a pesar de setear

inicialmente en cero la deformación cuando los cabezales se encuentran a la mínima distancia.



Figura 3.11: Sensores de medición: a) celda de carga; b) extensómetro.

Antes de utilizar el extensómetro fue necesario calibrarlo para tener una ecuación de conversión de volts a mm. Para ello se disponía de cinco calibres de largo conocido: se montaron las tenazas del extensómetro sobre el largo conocido y se anotó el valor correspondiente en volts que marcaba el extensómetro. Con los cinco puntos se obtuvo la curva que se presenta en la figura 3.12.

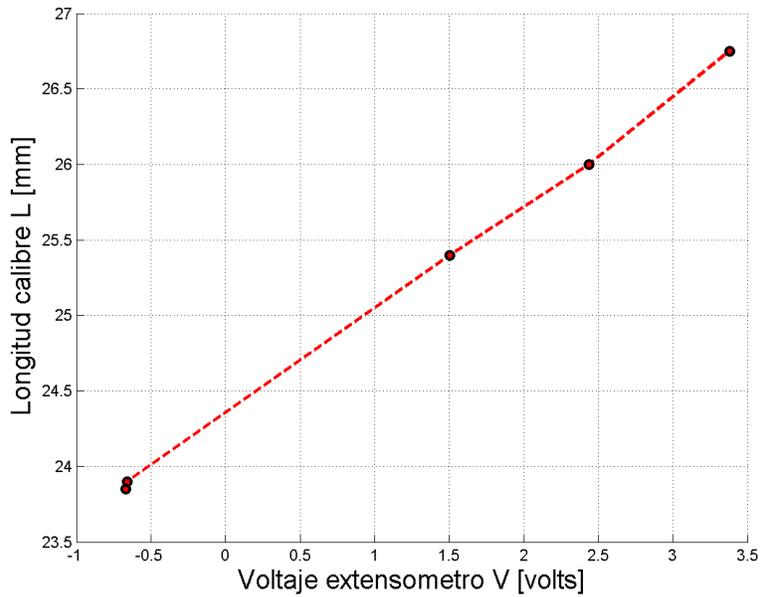


Figura 3.12: Curva de calibración del extensómetro.

Con esta curva se hace una regresión lineal y se obtiene la ecuación de conversión del extensómetro que se presenta en la ecuación 3.2. Ahí, el voltaje  $V_0$  corresponde al valor entregado por el extensómetro en el punto donde se fija el origen de desplazamiento (0 mm). En este caso, de la regresión se obtuvo  $V_0=24.338$  volts.

$$L[mm] = 0,7029 * V[volts] + V_0[volts] \quad (3.2)$$

$$corr = 0,9996$$

$$r^2 = 0,9992$$

La curva de conversión de la celda de carga es aquella que se muestra en la ecuación 3.3, que convierte volts a fuerza en Kgf.

$$F[Kgf] = 62,208 * V[volts] \quad (3.3)$$

Estos voltajes que se utilizan en las curvas de calibración de la celda de carga y el extensómetro son los que entrega el computador, esto es, una vez que ya han sido amplificados

por el acondicionador de señal (la explicación respectiva se da más adelante).

En los ensayos de tracción a la fractura se considera que es dañino para el extensómetro mantenerlo hasta la fractura de la probeta, debido al impacto a que es sometido, debido a esto, en algunos ensayos a la fractura no se mantuvo el extensómetro hasta el final, sino que se retiró antes. Después del retiro del extensómetro, los valores de deformación se tomaban con el dial mecánico digital (figura 3.8).

Como se mencionó anteriormente, la termocupla del sistema de control térmico no entrega lecturas de temperatura representativas de la cámara térmica debido a que se encuentra ubicada cerca del ventilador interior del sistema de intercambio térmico. Debido a esto, C. Mir instaló una serie de termoresistores en diversos lugares de la cámara, como se muestra en la figura 3.13 a).

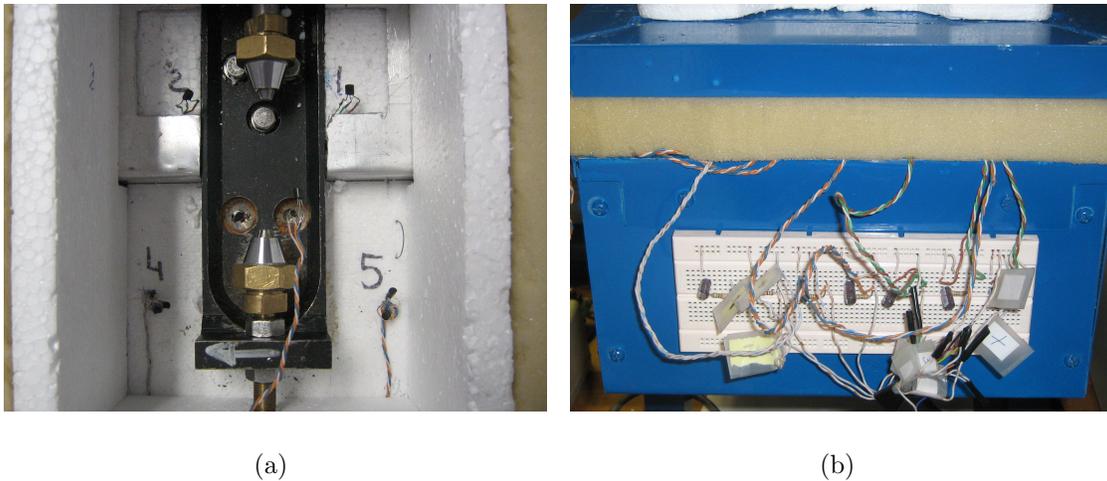


Figura 3.13: Incorporación de termoresistores: a) ubicación dentro de la cámara; b) circuito para evitar acoplamiento de señales.

Estos termoresistores son sensores del tipo LM35DZ y pueden ser utilizados como sensores de temperatura. En la figura 3.14 se presenta el diagrama de conexión, el circuito básico para utilizar un termoresistor como sensor de temperatura y el circuito conocido como Damper R-C, que se debe incorporar por cada sensor cuando se utilizan varios de ellos, para evitar el acoplamiento de señales. En la cámara se colocaron varios termoresistores y por cada uno de ellos se tuvo que agregar un circuito Damper R-C. Todos los circuitos se montaron sobre

el protoboard que se presenta en la figura 3.13 b)

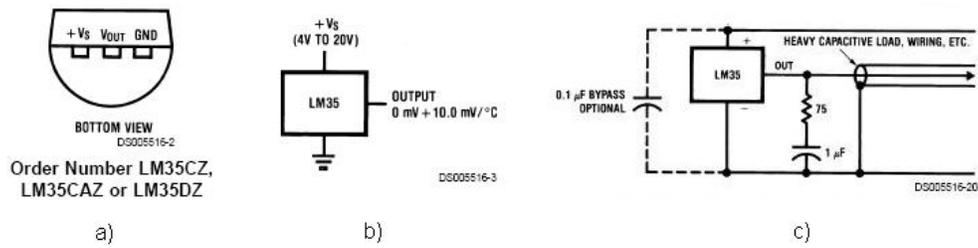


Figura 3.14: LM35DZ usado como sensor de temperatura: a) diagrama de conexión; b) en circuito básico; c) en circuito Damper R-C .

El circuito de los termorresistores se alimentó con 13 volts provenientes de la fuente DC que se presenta en la figura 3.15 a).

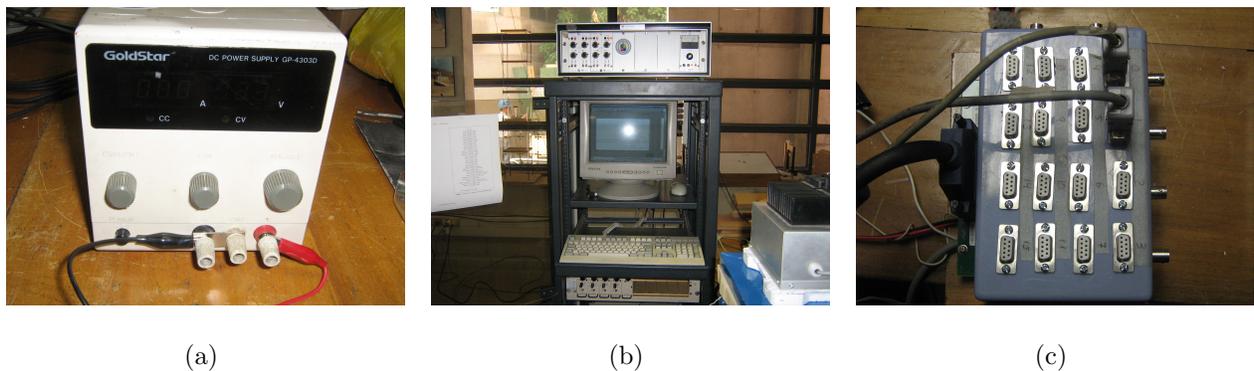
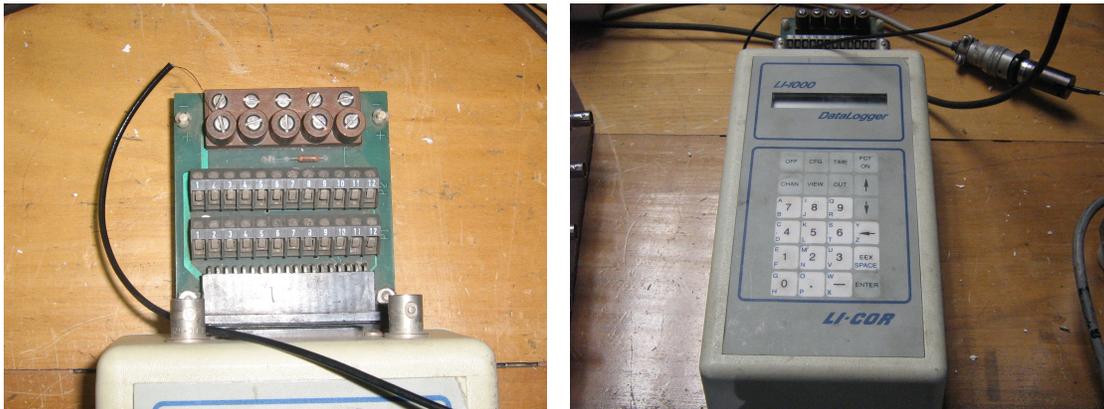


Figura 3.15: Adquisición de datos: a) fuente DC; b) acondicionador de señal y PC; c) terminal de conexión.

Los voltajes entregados directamente por el extensómetro y la celda de carga son muy pequeños, del orden de los milivolts, por lo que es necesario amplificarlos para que puedan ser leídos por una tarjeta de adquisición de datos. Para ello se utiliza el acondicionador de señal que se muestra en la figura 3.15 b). Luego de ser amplificados por el acondicionador, las señales van al terminal de conexión que se muestra en la figura 3.15 c). Las señales de los termoresistores también van a este terminal, luego de ser desacopladas. Del terminal de conexión salen las señales de los termoresistores, la celda y el extensómetro hacia la tarjeta de adquisición de datos que esta puesta dentro del computador que se muestra en la figura 3.15 b). Esta tarjeta transforma los datos voltaicos en datos binarios que pueden ser leídos por el computador. En la figura 3.17 se muestra un esquema de conexión de los diferentes

componentes del sistema de adquisición de datos.

Para medir la temperatura directamente en la superficie de la probeta, se construyó una termocupla con alambre de cobre barnizado, de 0.1 mm de diámetro y alambre Constantan de 0.2 mm de diámetro. Se soldaron en un extremo, teniendo cuidado de pelar los alambres para tener buen contacto y luego se embutieron en una baina plástica para un mejor cuidado. Los extremos no soldados de los alambres se conectaron al terminal de conexión como se muestra en la figura 3.16 a), el cual va conectado al DataLogger marca LI-COR, modelo LI-1000, que se muestra en la figura 3.16 b), que es una tarjeta de adquisición que transforma el voltaje entre los terminales no soldados de la termocupla en un valor de temperatura. El extremo soldado va adherido a la probeta como se muestra en la figura 3.11 b).



(a)

(b)

Figura 3.16: Sistema de medición temperatura en la superficie de la probeta: a) terminal de conexión termocupla; b) Data Logger .

El diámetro de los alambres de la termocupla se eligió teniendo en consideración su baja inercia térmica en comparación a la de la probeta, para no sesgar la medición. El funcionamiento de la termocupla se basa en el efecto Seebeck [16].

Las mediciones de temperatura en la superficie del alambre entregadas por la termocupla no diferían mucho de aquéllas entregadas por los termorresistores cercanos al alambre. Sin embargo estas dos mediciones diferían bastante de aquellas entregadas por el panel digital del control del sistema de intercambio térmico (figura 3.9 b)). Para un determinado valor seteado

en el panel de control, se midió la temperatura en el alambre (en condiciones similares a las que se realizarían los ensayos), encontrándose los valores que se presentan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Mediciones hechas en este trabajo.

Temperatura en el alambre [°C]	Temperatura en el panel de control [°C]	Temperatura seteada en el panel de control [°C]
50.8	62	62
24.92	27	27
20	22	22
5.8	2	-10

Se deseaba que la temperatura más baja en el alambre fuera 0 °C, sin embargo esta temperatura no se alcanzó y sólo se logró alrededor de 5 a 6 °C (después de dos horas), medidos con la termocupla de constantant en la superficie del alambre, esto a pesar de setear el control en -10 °C. La temperatura que marcaba el control era solo de 2 °C (termocupla del sistema de intercambio térmico ubicada cerca de los ventiladores). Por lo tanto, **se considerarán como temperaturas nominales de ensayo: 6, 20, 25 y 50 °C.**

Al revisar los registros de temperatura de C. Mir, se observa que tampoco alcanzó una temperatura de 0 °C en el alambre, mas bien sus temperaturas eran similares a las encontradas en este trabajo, sin embargo él consideró la temperatura nominal más baja como 0 °C.

En la figura 3.17 se presenta un esquema global del montaje de la máquina de ensayos, junto con todos sus componentes, equipos anexos, sensores y conexiones.

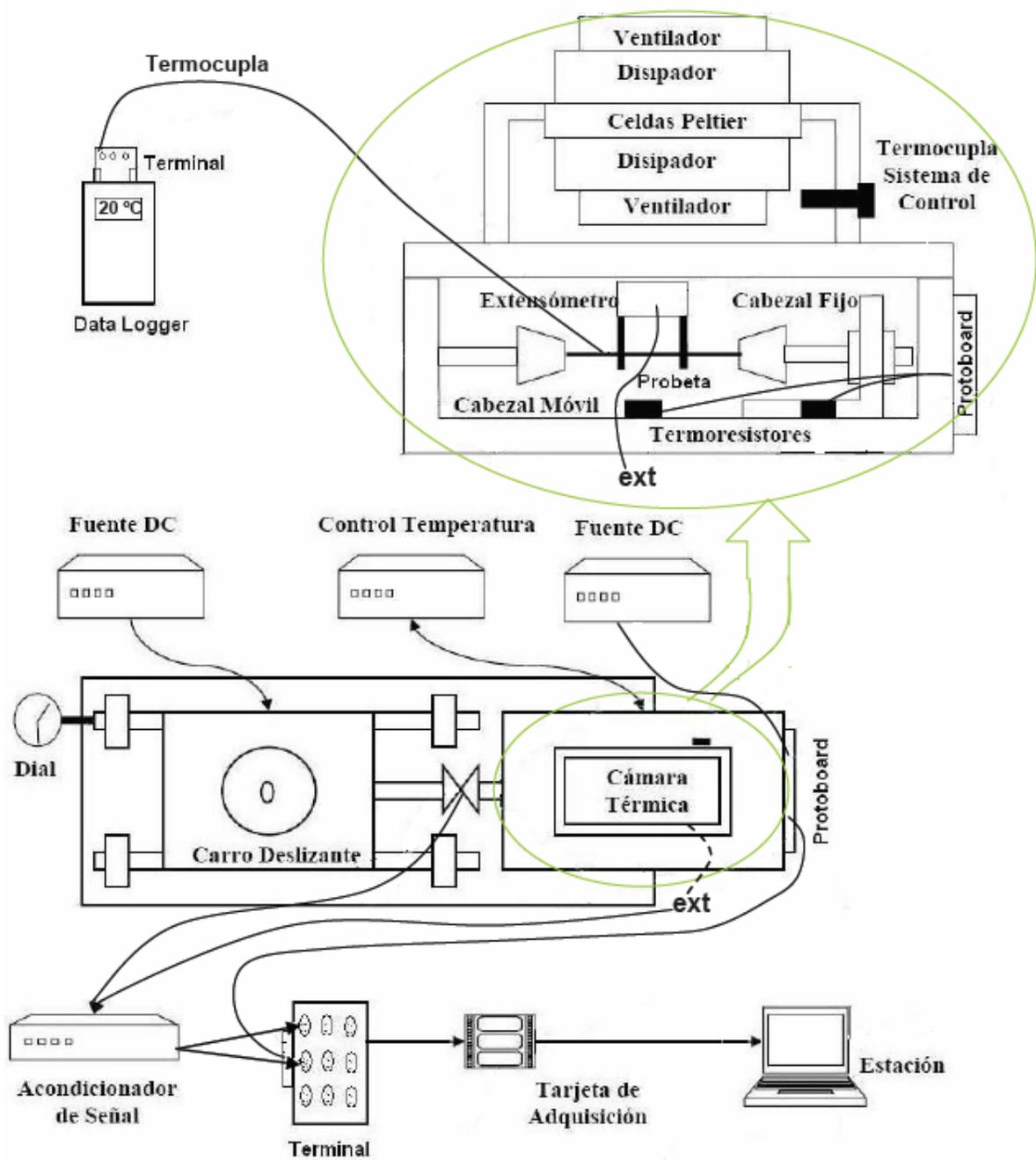


Figura 3.17: Montaje global, vista superior. La cámara térmica está ampliada y se presenta en una vista lateral.

### 3.3.6. Procedimiento para realizar un ensayo de tracción a la fractura

1. Realizar marcas en la probeta a una separación de 65 mm, dejando libre en los extremos 1.25 mm aproximadamente. Estos 65 mm corresponden a la separación que se dejará entre las mordazas. Las marcas deben realizarse con un lápiz a pasta y se debe tratar de no borrarlas, ya que cuando la probeta se fractura se vuelve a medir la distancia entre las marcas para detectar el grado de deformación plástica.
2. Ajustar la carrera máxima del cabezal móvil utilizando la combinación de 30 % deformación en la excéntrica superior y 0 % en la excéntrica inferior.
3. Montar la probeta en la mordaza móvil del sistema, cuidando que la marca en la probeta quede en el límite de la mordaza.
4. Desplazar el carro deslizante a la posición en que la mordaza móvil se encuentre a la distancia de separación mínima de la mordaza fija. Esto se logra rotando de forma manual el eje motriz del sistema y verificando la posición del carro en el dial mecánico, ubicado en uno de sus extremos opuesto al cabezal móvil. El dial se ubica de tal forma que mida el desplazamiento longitudinal de uno de los dos ejes del carro.
5. Iniciar el sistema de adquisición de datos, verificando que los distintos canales utilizados estén tomando lectura.
6. Balancear la celda de carga en cero.
7. Montar la probeta en la mordaza fija del sistema, cuidando que la marca en la probeta quede en el límite de la mordaza.
8. Ajustar sistema de tuercas de la mordaza fija, de tal forma que la probeta no presente tensión.
9. Adherir el extremo soldado de la termocupla de constantan en la probeta. Esto se puede hacer con una delgada franja de scotch.
10. En la zona central de la probeta realizar la reducción de área, estableciendo una zona debilitada leve en comparación con el resto de la probeta, con el objetivo de influenciar que el rompimiento ocurra entre las tenazas del extensómetro. Esto se logró mediante

un leve pulido con lija al agua de malla 800, controlando que el pulido se realice en todo el perímetro de la probeta y que sea el mínimo y constante para todas las probetas a ensayar.

11. Desplazar el carro de modo manual, rotando el eje motriz, hasta que la celda comience a presentar lecturas positivas crecientes.
12. Calibrar el dial mecánico en cero.
13. Desplazar el carro, hasta lograr una tensión mínima que permita montar el extensómetro. Un valor que resultó adecuado en la mayoría de los ensayos a la fractura fue **0,02 volts** en la lectura de la celda de carga.
14. Montar el extensómetro en la probeta, verificando que la zona de área reducida quede ubicada entre las dos tenazas de éste. Una vez hecho lo anterior retirar el seguro.
15. Balancear el extensómetro en cero.
16. Cerrar la cámara térmica y establecer la temperatura de ensayo.
17. Una vez adquirida la temperatura, balancear nuevamente el extensómetro en cero.
18. Registrar la lectura de la celda de carga y el dial mecánico.
19. Iniciar de forma manual el desplazamiento del carro, cuidando que se realice mediante un movimiento lento y constante del eje motriz.
20. En un valor cercano al límite máximo de tracción esperado, se debe retirar el extensómetro, con el objetivo de que éste no se dañe debido al desplazamiento brusco que se sometería en el caso de una ruptura de la probeta. Luego de retirar el extensómetro registrar el valor de las lecturas de la celda de carga y el dial mecánico.
21. Continuar de forma manual el desplazamiento del carro hasta que rompa la probeta, registrando valores intermedios periódicos y el del momento de la ruptura, de las lecturas entregadas por la celda de carga y el dial mecánico.
22. Las probetas fracturadas se retiran de las mordazas, marcando ambos trozos con igual identificación.

23. Ubicar ambas partes de la probeta fracturada en una superficie plana, acomodándolas de tal forma que queden unidas como si no estuvieran fracturadas y medir el largo entre las marcas hechas inicialmente. Al acomodar ambas partes de la probeta se debe tener cuidado de no alterar las superficies de fractura, por si se requiriera un posterior análisis de los planos de fractura.

En la mayoría de los ensayos de tracción se mantuvo el extensómetro hasta la fractura, ya que por tratarse de una alambre tan delgado se consideró que el impacto no era tan grande. En este caso, los pasos 18, 20 y 21 no son necesarios de realizar.

### 3.3.7. Procedimiento para realizar un ensayo cíclico

1. Realizar marcas en la probeta a una separación de 70 mm, dejando libre en los extremos 1 mm aproximadamente. Estos 70 mm corresponden a la separación que se dejó entre las mordazas. Las marcas deben realizarse con un lápiz a pasta y se debe tratar de no borrarlas, ya que cuando la probeta se fractura se vuelve a medir la distancia entre las marcas para detectar el grado de deformación plástica. La diferencia de largo entre mordazas con los ensayos a la fractura se debe exclusivamente a que en estos últimos era más difícil colocar la probeta en las mordazas, con un largo de 70 mm.
2. Seleccionar la combinación de perforaciones de las levas, de acuerdo al porcentaje de deformación que se desea imponer. Para los ensayos realizados en este trabajo se utilizaron las siguientes combinaciones:

Tabla 3.4: Porcentajes de deformación y combinaciones utilizadas.

Perforación		Deformación nominal probeta [%]
Superior	Inferior	
5 %	5 %	0,8
5 %	10 %	1,5
2 %	5 %	2,2

3. Establecer la frecuencia a la cual se realiza el ensayo. Para ello se deben ajustar las perillas de la fuente DC de voltaje variable del motor y verificar que dicho ajuste entrega la frecuencia deseada. Se puede utilizar un cronómetro y contar el número de ciclos efectuados por el cabezal móvil en una unidad de tiempo.

4. Montar la probeta en la mordaza móvil, cuidando que la marca en la probeta quede en el límite de la mordaza.
5. Iniciar el programa de adquisición de datos, verificando que los distintos canales estén tomando lectura.
6. Balancear el cero de la celda de carga.
7. Desplazar el carro deslizante a la posición en que la mordaza móvil se encuentre a la distancia de separación mínima de la mordaza fija. Esto se logra rotando de forma manual el eje motriz del sistema y verificando la posición del carro en el dial mecánico, ubicado en uno de sus extremos y opuesto al cabezal móvil. El dial se ubica de tal forma que mida el desplazamiento longitudinal de uno de los dos ejes del carro.
8. Montar la probeta en la mordaza fija, cuidando que la marca en la probeta quede en el límite de la mordaza.
9. Adherir el extremo soldado de la termocupla de constantant en la probeta. Esto se puede hacer con una delgada franja de scotch.
10. Establecer la pretensión inicial, utilizando el sistema de tuercas ubicado en la mordaza fija. Un valor que resultó adecuado en la mayoría de los ensayos cíclicos fue **0,045 volts** en la lectura de la celda de carga.
11. Montar el extensómetro en la probeta y retirar el seguro.
12. Balancear el cero del extensómetro.
13. Cerrar la cámara térmica y establecer la temperatura deseada.
14. Balancear nuevamente el extensómetro.
15. Dar inicio al ensayo activando la palanca de encendido de la fuente DC de voltaje variable del motor.
16. El ensayo cíclico debe tener una duración controlada. Los ensayos realizados a una frecuencia de 1 Hz tuvieron una duración aproximada de 60 s.

17. Al completarse el tiempo de ciclado, se debe detener la máquina y terminar el último ciclo de forma manual, de tal forma de volver el carro a la zona de inicio de la carrera, es decir al punto en que el cabezal móvil se encuentre a la mínima distancia del cabezal fijo.
18. Retirar la probeta y registrar la distancia entre las marcas.
19. En algunos casos la probeta ciclada fue posteriormente ensayada a la fractura, por lo que se debe realizar el procedimiento correspondiente ya descrito.

Debe notarse que la metodología utilizada permite ensayar la probeta exclusivamente en tracción, lo cual es ventajoso ya que el alambre no resiste compresión. Esto se logra al partir todos los ensayos cíclicos desde el mismo punto, es decir, el punto en que los cabezales se encuentran a la mínima distancia. La deformación que se impone a la probeta viene dada por el desplazamiento sinusoidal entregado por el sistema de excéntricas ajustables.

## Capítulo 4

# Resultados Experimentales

### 4.1. Tratamientos Térmicos y Caracterización de la Microestructura

En la figura 4.1 se presenta una imagen de la microestructura inicial del material de aleación, en condiciones de salida de fábrica. Se puede observar que no existe una morfología definida de la microestructura, sin embargo se pueden apreciar formas alargadas lo cual podría corresponder a granos deformados por trefilación.



Figura 4.1: Material de aleación en condiciones de salida de fábrica.

*OBS: En todas las metalografías que se presenten en este trabajo de memoria el eje longitudinal del alambre es horizontal.*

Como se mencionó en la sección 3.2.3, las probetas utilizadas fueron cortadas de 9 cm. de largo y se prepararon horneadas para tiempos de permanencia dentro del horno (a 705 °C de temperatura nominal) de: 20, 30 y 180 s. Para cada tiempo se prepararon dos horneadas de cinco probetas cada una, es decir 30 en total. Se realizaron observaciones en el microscopio óptico y se obtuvieron los resultados que se presentan en las figuras 4.2 a la 4.7, para cada tiempo y horneada.

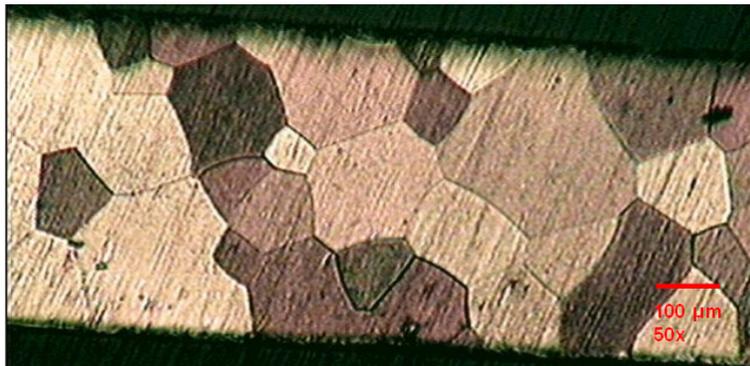


Figura 4.2: Primera horneada de probetas tratadas a 705 °C por 20 s.

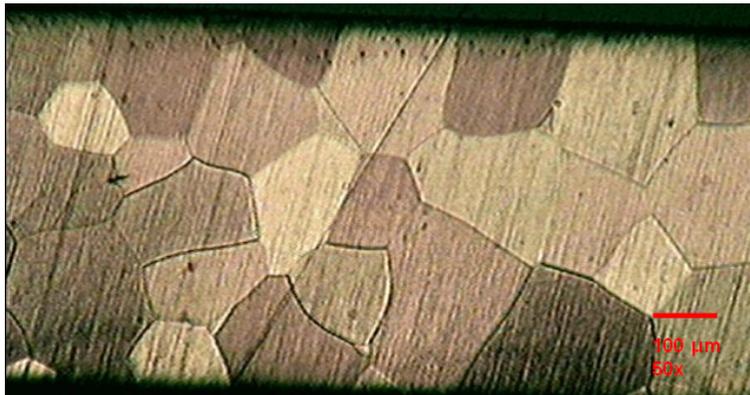


Figura 4.3: Segunda horneada de probetas tratadas a 705 °C por 20 s.

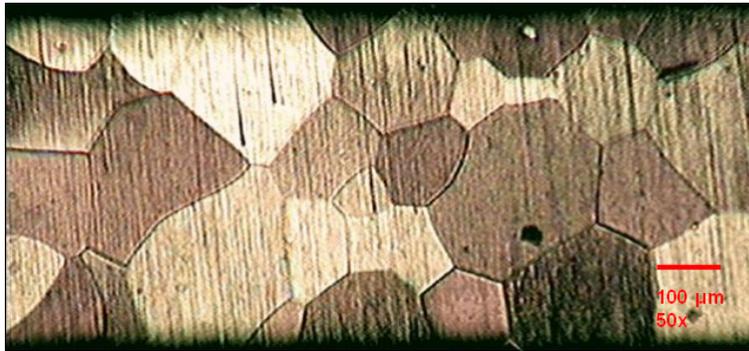


Figura 4.4: Primera horneada de probetas tratadas a 705 °C por 30 s.

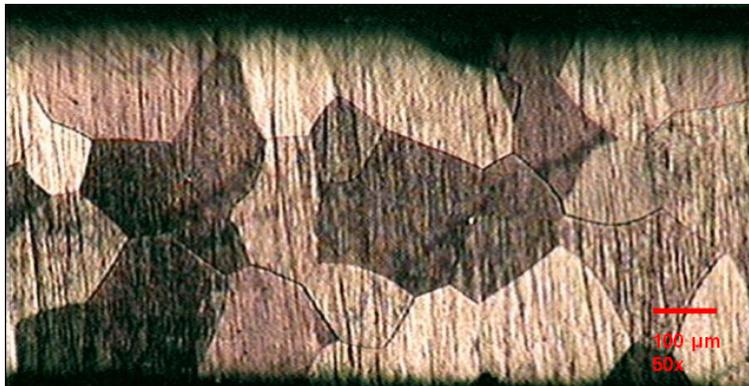


Figura 4.5: Segunda horneada de probetas tratadas a 705 °C por 30 s.

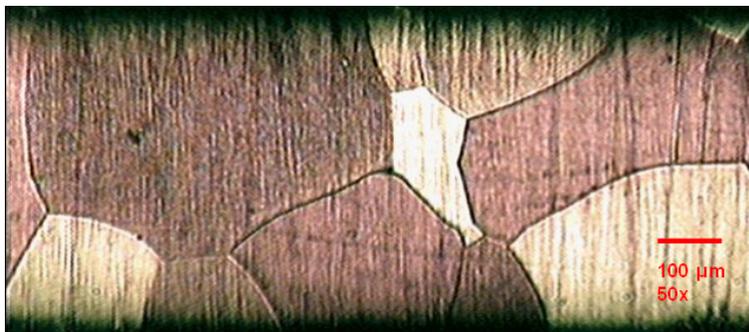


Figura 4.6: Primera horneada de probetas tratadas a 705 °C por 180 s.

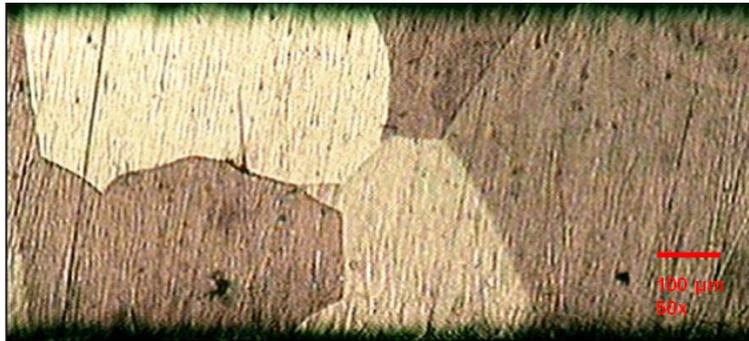


Figura 4.7: Segunda horneada de probetas tratadas a 705 °C por 180 s.

El tamaño de grano se midió de acuerdo a los dos procedimientos descritos en la sección 3.2.4. Los resultados de las mediciones por ambos métodos se presentan a continuación.

**1.- Determinación del tamaño de grano  $d$  por medición directa de cada grano.**

Para cada horneada, de cada tiempo, se tomaron por sobre 30 mediciones longitudinales. Los valores medidos se presentan en las tablas 4.1 a 4.6. En la última fila de cada tabla se muestra el promedio y la desviación estándar de el promedio. En cada tabla se indica el tiempo y la horneada.

Tabla 4.1: Mediciones de granos primera horneada probetas tratadas a 705 °C, 20 s.

Tamaño de grano $d$ [ $\mu m$ ]												
130	190	25	30	100	20	65	20	60	130	130	100	40
150	110	30	130	140	165	80	35	125	40	85	180	120
130	180	115	120	30	260	220	100	250	140	25		
$n = 37, \bar{d} = 108.1, S_{n-1} = 64.71$												

Tabla 4.2: Mediciones de granos segunda horneada probetas tratadas a 705 °C, 20 s.

Tamaño de grano d [ $\mu m$ ]											
110	150	130	100	50	200	140	115	115	180	120	100
90	210	70	90	150	140	100	100	30	80	20	115
25	100	120	85	135	130	95	40	170	165	165	
$n = 35, \bar{d} = 112.4, S_{n-1} = 46.66$											

Tabla 4.3: Mediciones de granos primera horneada probetas tratadas a 705 °C, 30 s..

Tamaño de grano d [ $\mu m$ ]											
185	230	50	80	125	95	65	110	50	130	75	105
90	250	125	20	200	120	180	75	90	65	80	210
135	30	110	250	80	60	80	70	80	85	20	
$n = 35, \bar{d} = 108.7, S_{n-1} = 61.91$											

Tabla 4.4: Mediciones de granos segunda horneada probetas tratadas a 705 °C, 30 s.

Tamaño de grano d [ $\mu m$ ]											
85	65	130	140	60	135	120	140	110	195	140	
115	70	75	45	150	20	60	130	190	190	75	
95	60	70	175	175	150	210	275	155			
$n = 31, \bar{d} = 122.7, S_{n-1} = 57.3$											

Tabla 4.5: Mediciones de granos primera horneada probetas tratadas a 705 °C, 180 s.

Tamaño de grano d [ $\mu m$ ]											
65	90	340	380	140	205	140	300	100	265	150	
220	350	270	70	250	230	60	250	135	485	65	
250	200	180	180	360	230	350	180	55	140	265	
$n = 33, \bar{d} = 210.6, S_{n-1} = 107.2$											

Tabla 4.6: Mediciones de granos segunda horneada probetas tratadas a 705 °C, 180 s.

Tamaño de grano d [ $\mu m$ ]									
515	150	345	100	350	460	85	85	140	230
370	175	180	160	180	50	300	200	180	350
200	150	690	160	115	105	220	20	480	
$n = 29, \bar{d} = 232.6, S_{n-1} = 156.1$									

Como los los valores presentados en las tablas anteriores corresponden directamente a largos de grano, entonces se puede realizar un análisis estadístico del tamaño de grano. En particular se determinarán intervalos de confianza para el promedio.

De acuerdo a un teorema ampliamente usado en Estadística Inferencial (ver Apéndice A), se tiene que la variable aleatoria T, definida en la ecuación 4.1, sigue una distribución de T-Student a n-1 grados de libertad.

$$T = \frac{(\bar{d} - \mu)\sqrt{n}}{S_{n-1}} \rightarrow T_{n-1} \quad (4.1)$$

Donde  $\mu$  es la media poblacional,  $\bar{d}$  y  $S_{n-1}$  son el promedio y la desviación estándar de una muestra de tamaño n. Este resultado es válido independientemente de la distribución que sigan las variables aleatorias  $d_i$  (cada valor medido). Para  $n \geq 30$  se obtienen aproximaciones realmente buenas.

Usando lo anterior se puede encontrar un Intervalo de Confianza (I.C.) para  $\mu$ , a partir de  $\bar{d}$  y  $S_{n-1}$  de una muestra. En la tabla 4.7, para cada tiempo y cada horneada, se muestra un I.C. determinado para el tamaño de grano promedio poblacional, a partir de las muestras encontradas. El procedimiento se describe en el Apéndice A.

Tabla 4.7: Determinación de I.C. para el tamaño de grano logrado por tratamientos a 705 °C.

Tiempo [s]	Horneada	n	$\bar{d}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$S_{n-1}$ [ $\mu\text{m}$ ]	1- $\alpha$ *	I.C.
20	primera	37	108.1	64.7	0.95	$86.53 \leq \mu \leq 129.67$
	segunda	35	112.4	46.7	0.95	$96.37 \leq \mu \leq 128.43$
30	primera	35	108.7	61.9	0.95	$87.44 \leq \mu \leq 129.96$
	segunda	31	122.7	57.3	0.95	$101.68 \leq \mu \leq 143.72$
180	primera	33	210.6	107.2	0.95	$172.59 \leq \mu \leq 248.61$
	segunda	29	232.6	156.1	0.95	$173.23 \leq \mu \leq 291.97$

\* Nivel de confianza

## 2.- Determinación del tamaño de grano $d$ por MLI.

Por medio del MLI descrito en la sección 3.2.4 se obtuvieron los valores que se presentan en las tablas 4.8 a la 4.13. Para cada tiempo y horneada se consideraron 4 imágenes de

distintas zonas de la probeta y en cada una de ellas se trazaron 3 líneas verticales de 300  $\mu\text{m}$  de largo y 3 líneas horizontales de 1091  $\mu\text{m}$  de largo.

Tabla 4.8: Medición de granos por MLI, primera horneada probetas tratadas a 705 °C, 20 s.

Línea nº		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	$\bar{d}$ [ $\mu\text{m}$ ]
nº de granos	vert.	5	2	2	3	3	4	2	3	3	2	3	2	-
	hor.	12	9	5	10	10	10	11	10	12	7	7	6	-
Tamaño de grano d [ $\mu\text{m}$ ]	vert.	60	150	150	100	100	75	150	100	100	150	100	150	115
	hor.	91	121	218	109	109	109	99	109	91	156	156	182	129
<b>Global</b>														<b>122</b>

Tabla 4.9: Medición de granos por MLI, segunda horneada probetas tratadas a 705 °C, 20 s.

Línea nº		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	$\bar{d}$ [ $\mu\text{m}$ ]
nº de granos	vert.	3	3	3	1	4	3	4	3	3	3	3	4	-
	hor.	9	8	9	11	8	6	9	8	11	9	7	8	-
Tamaño de grano [ $\mu\text{m}$ ]	vert.	100	100	100	300	75	100	75	100	100	100	100	75	110
	hor.	121	136	121	99	136	182	121	136	99	121	156	136	131
<b>Global</b>														<b>120</b>

Tabla 4.10: Medición de granos por MLI, primera horneada probetas tratadas a 705 °C, 30 s.

Línea nº		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	$\bar{d}$ [ $\mu\text{m}$ ]
nº de granos	vert.	4	2	2	3	5	3	1	3	3	2	3	3	-
	hor.	7	10	9	9	9	9	7	7	10	6	8	4	-
Tamaño de grano [ $\mu\text{m}$ ]	vert.	75	150	150	100	60	100	300	100	100	150	100	100	124
	hor.	156	109	121	121	121	121	156	156	109	182	136	273	147
<b>Global</b>														<b>135</b>

Tabla 4.11: Medición de granos por MLI, segunda horneada probetas tratadas a 705 °C, 30 s.

Línea nº		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	$\bar{d}$ [ $\mu\text{m}$ ]
nº de granos	vert.	3	2	3	2	5	3	3	3	4	3	4	4	-
	hor.	8	7	7	9	9	9	9	8	10	11	10	10	-
Tamaño de grano [ $\mu\text{m}$ ]	vert.	100	150	100	150	60	100	100	100	75	100	75	75	99
	hor.	136	156	156	121	121	121	121	136	109	99	109	109	125
<b>Global</b>														<b>112</b>

Tabla 4.12: Medición de granos por MLI, primera horneada probetas tratadas a 705 °C, 180 s.

Línea n°		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	$\bar{d}$ [ $\mu\text{m}$ ]
n° de granos	vert.	1	2	2	2	2	3	2	1	2	1	2	2	-
	hor.	6	6	5	4	5	7	6	4	4	7	5	5	-
Tamaño de grano [ $\mu\text{m}$ ]	vert.	300	150	150	150	150	100	150	300	150	300	150	150	183
	hor.	182	182	218	273	218	156	182	273	273	156	218	218	212
<b>Global</b>														<b>198</b>

Tabla 4.13: Medición de granos por MLI, segunda horneada probetas tratadas a 705 °C, 180 s.

Línea n°		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	$\bar{d}$ [ $\mu\text{m}$ ]
n° de granos	vert.	2	2	1	1	1	1	2	1	2	3	2	2	-
	hor.	4	6	3	4	3	3	3	4	6	7	8	6	-
Tamaño de grano [ $\mu\text{m}$ ]	vert.	150	150	300	300	300	300	150	300	150	100	150	150	208
	hor.	273	182	364	273	364	364	364	273	182	156	136	182	259
<b>Global</b>														<b>234</b>

Un resumen de los tamaños de grano determinados por ambos métodos se presenta en la tabla 4.14.

Tabla 4.14: Resumen de mediciones de tamaño de grano.

Tiempo [s]	Horneada	Tamaño de grano [ $\mu\text{m}$ ]		Promedio [ $\mu\text{m}$ ]
		Método 1	Método 2	
20	primera	108.1	122	115.05
	segunda	112.4	120	116.2
30	primera	108.7	135	121.85
	segunda	122.7	112	117.35
180	primera	210.6	198	204.3
	segunda	232.6	234	233.3

Se puede observar que para los tiempos de permanencia de 20 y 30 s, tanto para la primera y segunda horneada, se obtuvieron tamaños de granos similares y por sobre 100  $\mu\text{m}$ , esto contrario a lo que se esperaba inicialmente, ya que para el tiempo 20 s se esperaba obtener un tamaño de grano alrededor de 60  $\mu\text{m}$ , mientras que para el tiempo de 30 s se esperaba un tamaño de grano de 100  $\mu\text{m}$ .

En vista de los valores encontrados, se asumirá un **tamaño de grano nominal de 115  $\mu\text{m}$**  para los tiempos de 20 y 30 s, tanto para la primera y segunda horneada y un **tamaño de grano nominal de 220  $\mu\text{m}$**  para el tiempo de 180 s, primera y segunda horneada.

Finalmente, un resumen del total de probetas con que se cuenta para realizar los ensayos de tracción y cíclicos es el siguiente:

1. 20 probetas de tamaño de grano nominal igual 115  $\mu\text{m}$ , preparadas en este trabajo de memoria.
2. 10 probetas de tamaño de grano nominal igual 220  $\mu\text{m}$ , preparadas en este trabajo de memoria.
3. 5 probetas de tamaño de grano nominal igual 60  $\mu\text{m}$ , preparadas por C. Mir.
4. 4 probetas de tamaño de grano nominal igual 100  $\mu\text{m}$ , preparadas por C. Mir.
5. 5 probetas de tamaño de grano nominal igual 200  $\mu\text{m}$ , preparadas por C. Mir.

Todas son de largo 90 mm.

## **4.2. Procedimiento de Análisis de los Registros de Datos Obtenidos**

### **4.2.1. Modificación de los registros**

Tanto en los ensayos cíclicos como en los de tracción se tienen dos registros de datos numéricos: los entregados por el extensómetro y la celda de carga, ambos se obtienen directamente en el computador como archivos de texto. Se tiene un tercer registro de datos que corresponde a la temperatura entregada por los termorresistores, pero estos no se analizan mayormente.

El programa que se utiliza para analizar los datos es Matlab 6.5. Los datos de los archivos de texto son convertidos a archivos de datos Matlab (.mat) y el tratamiento que se les hace es el que se describe a continuación:

1. En primer lugar son sometidos a una suavización o filtrado ya que los registros presentan mucho ruido electrónico. Cada dato es sometido n-veces a una suavización con la ecuación siguiente:

$$x_i = \frac{\sum_{j=i-n}^{i+n} x_j}{2 * n + 1} \quad (4.2)$$

Para sistemar la suavización se creó una función Matlab (todos los códigos utilizados se encuentran en el Apéndice B) con el siguiente encabezado:

$$R = suaviza(A, largo, k, nveces)$$

Donde A es una matriz de mx2 en que la primera columna corresponde a los valores del extensómetro y la segunda a los de la celda de carga. El *largo*=2\*n (con el n de la ecuación 4.2), k es la fila de la matriz hasta donde se quiere suavizar, *nveces* es la cantidad de veces que el dato es sometido a la suavización y R es la matriz de mx2 suavizada que entrega la función.

Para las curvas de tracción se consideró adecuado n=50 y nveces=20. Para las curvas cíclicas a una frecuencia de 1 Hz se utilizó n=6 y nveces=10. Una forma de ver qué tan adecuado es un n para un registro es, suavizarlo con ese n y luego comparar la curva suavizada con el registro original.

2. Se convierten los datos voltaicos del extensómetro y la celda a datos de deformación y esfuerzo ingenieril, utilizando las ecuaciones 3.2 y 3.3.
3. Se corta el rango de datos válidos, ya que siempre existe una cantidad de datos inútiles. Por ejemplo, en el tiempo que se tarda en parar el sistema de adquisición de datos luego de realizar un ensayo, se habrán tomado datos que no se usan.

Este tratamiento se les hace indistintamente a las curvas de tracción y cíclicas.

#### 4.2.2. Parámetros que se calculan en las curvas de tracción

Para poder cuantificar el comportamiento mecánico de la aleación es necesario calcular algunos parámetros importantes en las curvas de tracción y cíclicas, que representan distintos fenómenos que ocurren dentro del material.

En la figura 4.8 se muestran esquemáticamente los parámetros que se calcularon a las curvas de tracción y que se describen a continuación.

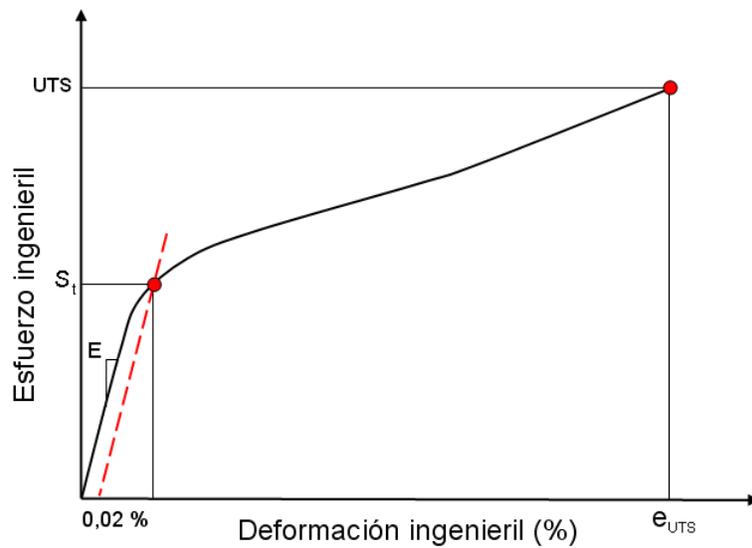


Figura 4.8: Parámetros curva tracción.

##### 1. *Módulo de Elasticidad Austenítico E*

Corresponde a la pendiente del tramo lineal inicial del registro (ver explicación que se da en la sección 4.2.4), en el cual la austenita se está deformando elásticamente. Es importante tener en cuenta que a mayor pretensión impuesta a la probeta, mayor es la probabilidad de que no se observe el tramo lineal inicial en el registro y por lo tanto no se pueda determinar E. A modo de ejemplo un valor de 0.016 volts en la celda equivale a 50 MPa, considerando el diámetro de 0.5 mm de la probeta.

##### 2. *Esfuerzo de Transformación S<sub>t</sub>*

Corresponde al punto en que se inicia la transformación de austenita a martensita, inducida por esfuerzos. Se determina trazando una recta con pendiente  $E$  desde el punto  $0.02\%$  de deformación en el eje de deformación hasta la intersección con la curva de tracción.  $S_t$  corresponde al punto de intersección entre la recta y la curva de tracción. A modo de comparación, en este trabajo también se calculó  $S_t$  para rectas que parten desde  $0.05$  y  $0.2\%$  en el eje de deformación (sólo para las curvas de tracción).

3. *Esfuerzo a la fractura UTS*

Es el valor de esfuerzo correspondiente al valor entregado por la celda de carga, un instante antes de la fractura.

4. *Deformación a la fractura  $e_{UTS}$*

Es el valor entregado por el extensómetro un instante antes de la fractura, es decir, es un valor medido con carga. Otro valor de deformación es el que se obtiene al medir el largo de los dos pedazos fracturados unidos de la probeta.

**4.2.3. Parámetros que se calculan en las curvas cíclicas**

En la figura 4.9 se muestran esquemáticamente los parámetros que se calcularon a las curvas cíclicas y que se describen a continuación.

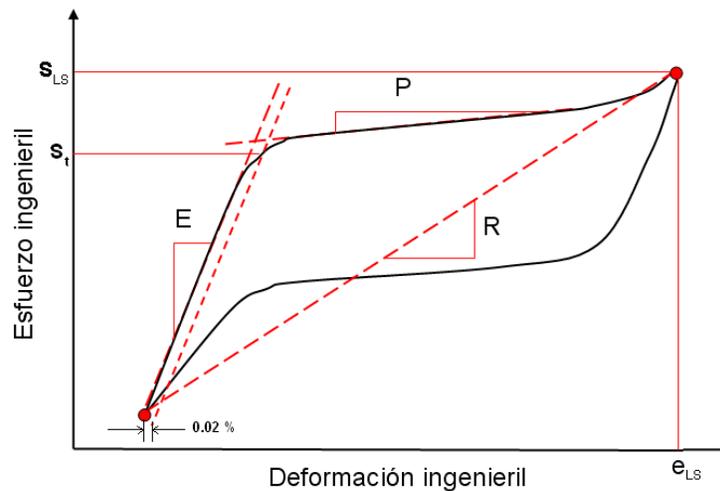


Figura 4.9: Parámetros curva cíclica

1. *Módulo de elasticidad austenítico  $E$*

Corresponde a la pendiente del tramo lineal inicial del ciclo, en el cual la austenita se

está deformando elásticamente. Se determina en la misma forma que en las curvas de tracción.

2. *Esfuerzo de Transformación  $S_t$*

Corresponde al punto en que se inicia la transformación de austenita a martensita inducida por deformación. Para el caso de las curvas cíclicas sólo se calculó un valor, considerando la recta trazada a partir del punto separado 0.02 % del punto de mínimo esfuerzo y deformación.

3. *Pendiente del Plateau  $P$*

Corresponde al segundo tramo lineal del ciclo, en el cual se mantiene la transformación desde austenita a martensita, por lo que en este tramo el material presenta una estructura bifásica.

4. *Rigidez Secante del Ciclo  $R$*

Corresponde a la pendiente de la línea que va desde el punto del ciclo de mínimo esfuerzo y deformación hasta el punto de máximo esfuerzo y deformación.

5. *Esfuerzo máximo del ciclo  $S_{ls}$*

Es el valor de esfuerzo máximo efectivo alcanzado en cada ciclo.

6. *Deformación máxima del ciclo  $e_{ls}$*

Es el valor de deformación máximo efectivo alcanzado en cada ciclo.

Un valor importante de calcular en las curvas cíclicas es el *Factor de Amortiguamiento*  $\xi$  presentado por el material, el cual se calcula en base a las áreas representativas del ciclo. Para calcularlo se utilizó la ecuación 4.3, definida por Chopra [11].

$$\xi_{Chopra} = \frac{E_d}{4 * \pi * E_s} \quad (4.3)$$

Las áreas utilizadas corresponden a las que se muestran en la figura 4.10.

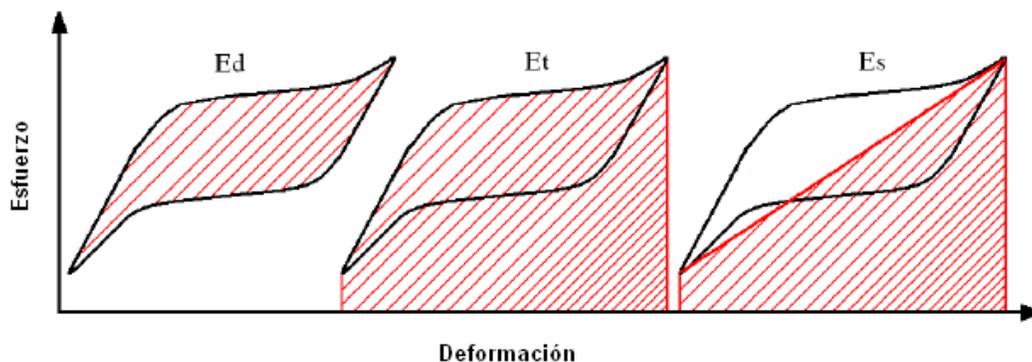


Figura 4.10: Áreas utilizadas para calcular el factor de amortiguamiento

Otra forma de calcular  $\xi$  es utilizando la ecuación 4.4, definida por Liu y Van Humbeeck [10]. Esta ecuación no se utilizó en este trabajo de memoria, sin embargo se calcularon las áreas para que el lector pueda calcularlo.

$$\xi_{Liu} = \frac{E_d}{2 * \pi * E_t} \quad (4.4)$$

#### 4.2.4. Estructura general de los registros

Como se describió en el procedimiento experimental, en cada ensayo de tracción y cíclico era necesario aplicar una pretensión, debido a lo cual para un esfuerzo  $S_1$  mayor que cero entregado por la celda de carga (ver figura 4.11), el extensómetro entrega una deformación igual a cero, por lo que se tiene un origen trasladado  $O_1$  y una curva incompleta. Para obtener la curva completa se debe agregar el trozo de curva que está en línea de trazos, para lo cual se usa la expresión 4.5, con esto se tiene el nuevo origen O. En resumen, se debe sumar  $e_1$  al registro original, con lo que se traslada horizontalmente la curva completa. Esta corrección se aplicó tanto a las curvas de los ensayos de tracción como a las curvas de los ensayos cíclicos.

$$S_1 = E * e_1 \quad (4.5)$$

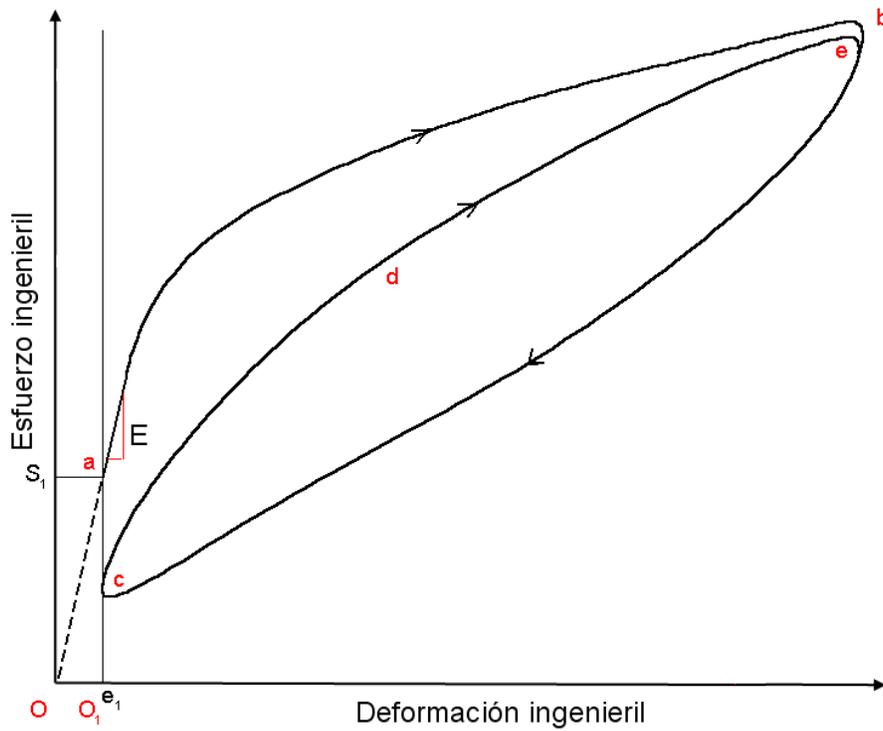


Figura 4.11: Corrección que se realiza a los registros de tracción y cíclicos.

En la corrección propuesta se asume que la pretensión aplicada es de un valor tal que aún se observe el rango lineal y se pueda determinar el valor de  $E$  a través de una regresión lineal. En el análisis de los datos, la regresión aplicada fue de manera tal que el coeficiente  $r^2$  fue siempre mayor o igual 0.99.

Se debe notar que en el caso de las curvas de los ensayos cíclicos con pretensión, la línea envolvente superior del ciclo (línea c-d-e) no coincide con la curva inicial (a-b).

En la figura 4.12 se presenta un registro cíclico completo, suavizado y trasladado horizontalmente de acuerdo a la corrección propuesta.

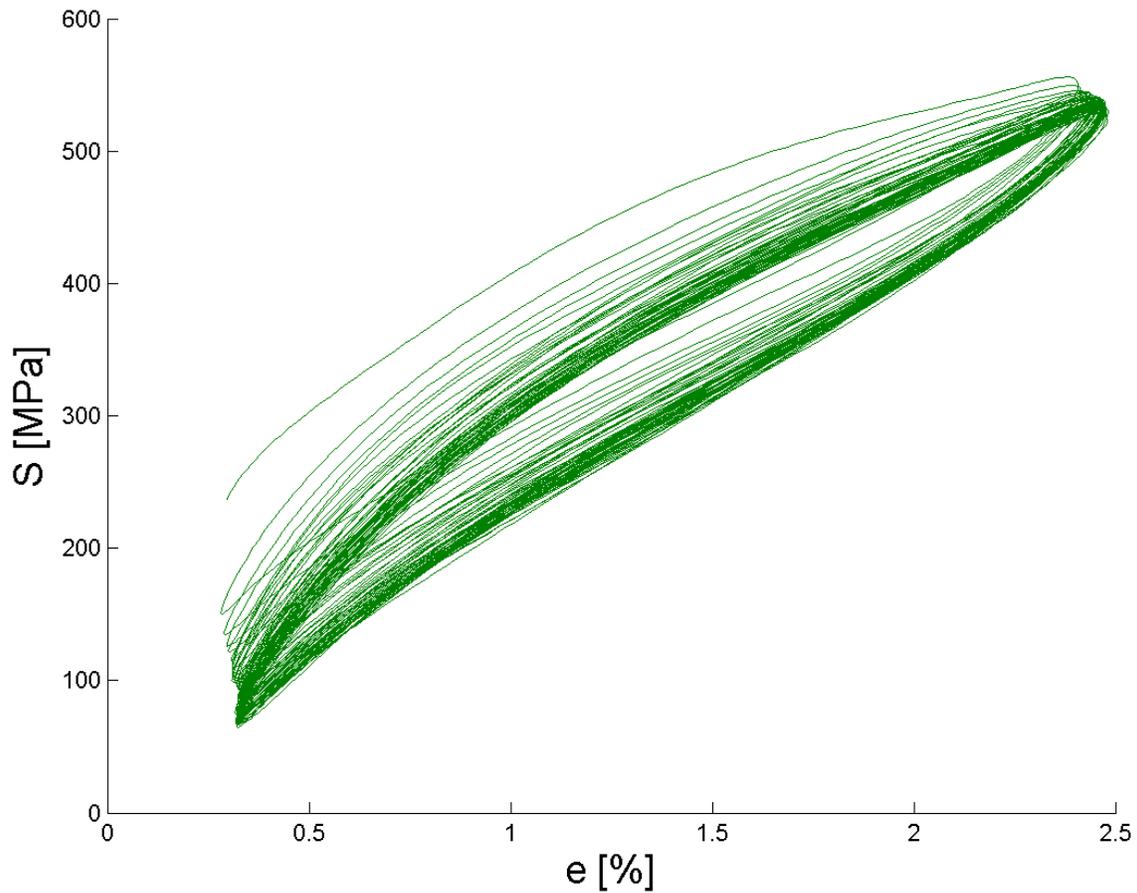


Figura 4.12: Estructura de los registros cíclicos.

Se puede observar que la forma de los ciclos no es estable y existe un fenómeno de traslación vertical hacia abajo y una estabilización parcial de la forma de los ciclos después de transcurridos varios de ellos (aproximadamente después del ciclo N° 40). En este fenómeno pueden incidir varios factores, como por ejemplo un relajamiento del material y soldadura en las mordazas de la máquina de ensayos. En la figura también se puede notar, que la pretensión aplicada en este caso fue de aproximadamente 230 MPa, un valor bastante alto que no permite observar el rango elástico inicial.

En la figura 4.13 se presenta la evolución del valor máximo y mínimo de esfuerzo de cada ciclo. Se puede observar que el mínimo decae en torno a 60 MPa durante el tiempo de ciclado, siendo este valor menor en el caso del máximo.

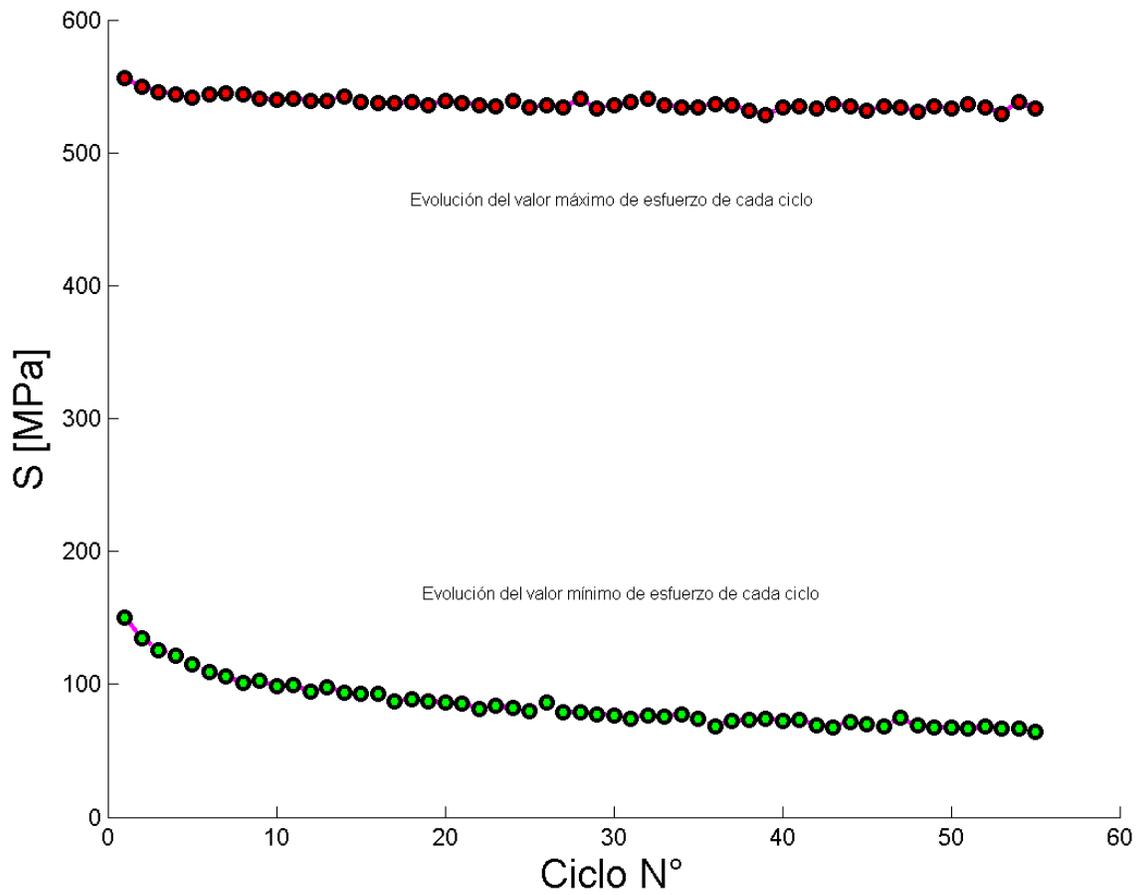


Figura 4.13: Variación de los mínimos y máximos de esfuerzo de los registros cíclicos.

Debido a este comportamiento mostrado por las curvas cíclicas, en sus análisis (sección 4.4) se presenta el ciclo N° 1, el 2 y un ciclo del final (aproximadamente el 40), cuando la curva se encuentra estabilizada parcialmente. Además, **los parámetros de las curvas cíclicas se calcularán para el segundo ciclo.**

### 4.3. Ensayos a la Fractura

#### 4.3.1. Ensayos de probetas de Acero y Cobre

Se realizaron ensayos a la fractura a 20 °C, con alambres de cobre y acero. Se utilizó una probeta de alambre de cobre tipo cable eléctrico barnizado comercial de 0.5 mm de diámetro y alambre de acero comercial de 0.9 mm de diámetro, ambos sin tratamiento térmico previo. La utilidad de este ensayo radica en la obtención de curvas de tracción que puedan ser comparadas en términos de sus parámetros con valores universalmente conocidos para el cobre y el acero, lo que permitirá en cierta forma validar la utilización de la máquina de ensayos y los procedimientos de análisis de los datos.

En la figura 4.14 se presentan las curvas obtenidas para el acero y el cobre. En la tabla 4.15 se muestran los parámetros que caracterizan estas curvas, donde además se muestran valores nominales de referencia [12] de cobre recocido, cobre deformado en frío y de acero AISI 1012 deformado en frío (barras de 19-32 mm de diámetro).

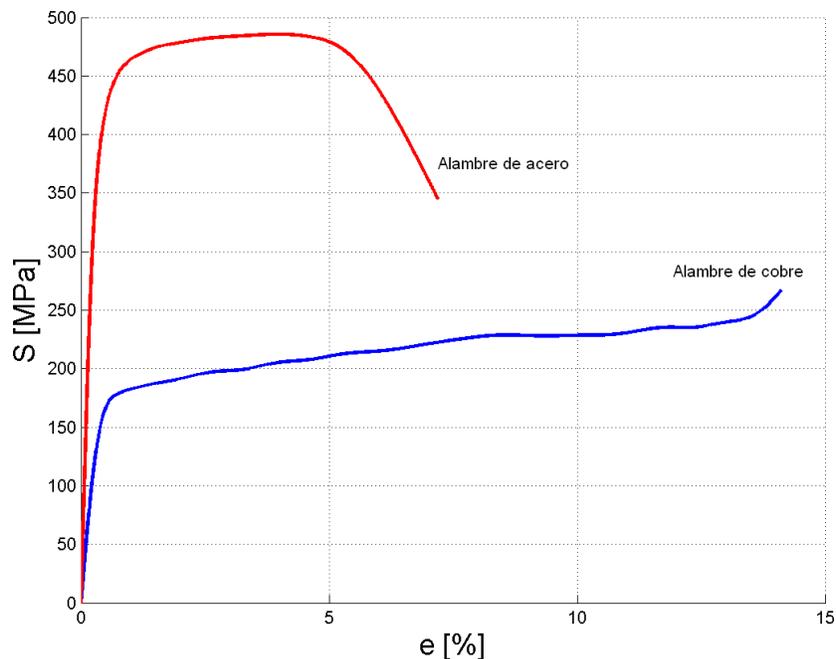


Figura 4.14: Curvas de tracción de probetas de Acero y Cobre.

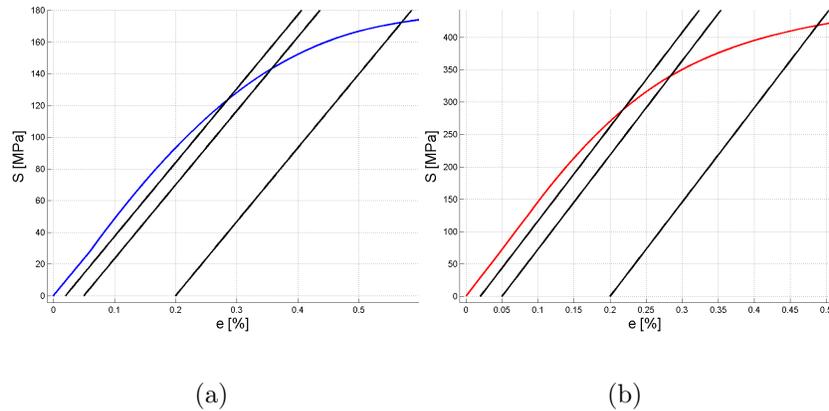


Figura 4.15: Determinación del esfuerzo de transformación: a) Alambre de cobre; b) Alambre de Acero.

Tabla 4.15: Parámetros curvas de tracción probetas de alambre de Acero, Cobre y referencias.

		E [GPa]	$S_t^*$ [MPa]			Máximos	
			1	2	3	UTS [MPa]	$e_{UTS}$ [%]
Cobre	Probeta	46,58	124	143	172	266,8	14,12
	Recocido	110	333	-	-	210	60
	Deformado en frío	110	333.4	-	-	344	14
Acero	Probeta	145,47	288	340	418	485,58	7,19
	Deformado en frío	200	310	-	-	370	19

\* 1 al 0.02 %, 2 al 0.05 % y 3 al 0.2 % deformación

Las rectas utilizadas para determinar el esfuerzo de transformación se muestran en la figura 4.15. Como se dijo en la sección 4.2.2, en las curvas de tracción se determinarán tres valores de  $S_t$ , con rectas que parten desde los puntos 0.02, 0.05 y 0.2 % en el eje de deformación.

A priori, el comportamiento de las probetas debería asemejarse más a un material deformado en frío, debido al proceso mediante el cual es fabricado el alambre (Trefilado [14]).

Se puede observar que existen diferencias entre los valores de referencia y los valores obtenidos para las probetas de cobre y de acero. Por ejemplo el módulo elástico de la probeta de cobre es casi la mitad del valor de referencia y el del acero es en torno a un 25 % menor, diferencias que en cierto modo se explican por el método usado para calcularlo. Los demás parámetros como el esfuerzo de transformación  $S_t$ , el UTS y la deformación máxima

$e_{UTS}$ , son dependientes de los tratamientos térmicos previos y la deformación en frío y por lo tanto se pueden considerar dentro de rango aceptables, esto a diferencia del módulo de Young que depende casi en forma exclusiva de las fuerzas de enlace atómico [13], siendo una propiedad casi inmodificable, pudiendo ser solo ligeramente afectado por elementos de aleación, tratamientos térmicos y procesos de deformación en frío.

En general en esta memoria se obtuvieron valores variables en los módulos de elasticidad, tanto en los ensayos a la fractura como en los ensayos cíclicos. Ésto corresponde a un comportamiento anómalo en un policristal que presente la propiedad de isotropía por compensación, ya que como se dijo, el valor de E depende casi exclusivamente de las fuerzas de enlace atómico, sin embargo si se tiene en consideración el diámetro del alambre y los tamaños de grano logrados a través de los tratamientos térmicos, se puede deducir que con el tamaño de grano más pequeño se tienen en promedio alrededor de 8 granos por diámetro de la probeta, mientras que con el tamaño más grande se tienen 2 granos por diámetro de la probeta. Por lo tanto, es probable que esta escasa cantidad de granos por probeta influya en que la aleación no presente la propiedad de isotropía por compensación, lo cual a su vez influya en que se obtengan valores diferentes de las propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad.

#### 4.3.2. Repetición del ensayo a 20 °C con probeta de 60 $\mu\text{m}$ , realizado por C. Mir

Con la realización de este ensayo se pretende verificar aquel realizado por C. Mir a la misma temperatura y con el mismo tamaño de grano, debido a que existían algunas sospechas en torno a la curva obtenida (ver figura 3.11 de ref. [1]), en términos del comportamiento que mostraba en el rango de la región bifásica, por lo cual se determinó su repetición.

En la figura 4.16 se muestra la curva obtenida junto con aquella obtenida por C. Mir. En la tabla 4.16 se presentan los parámetros característicos de la curva.

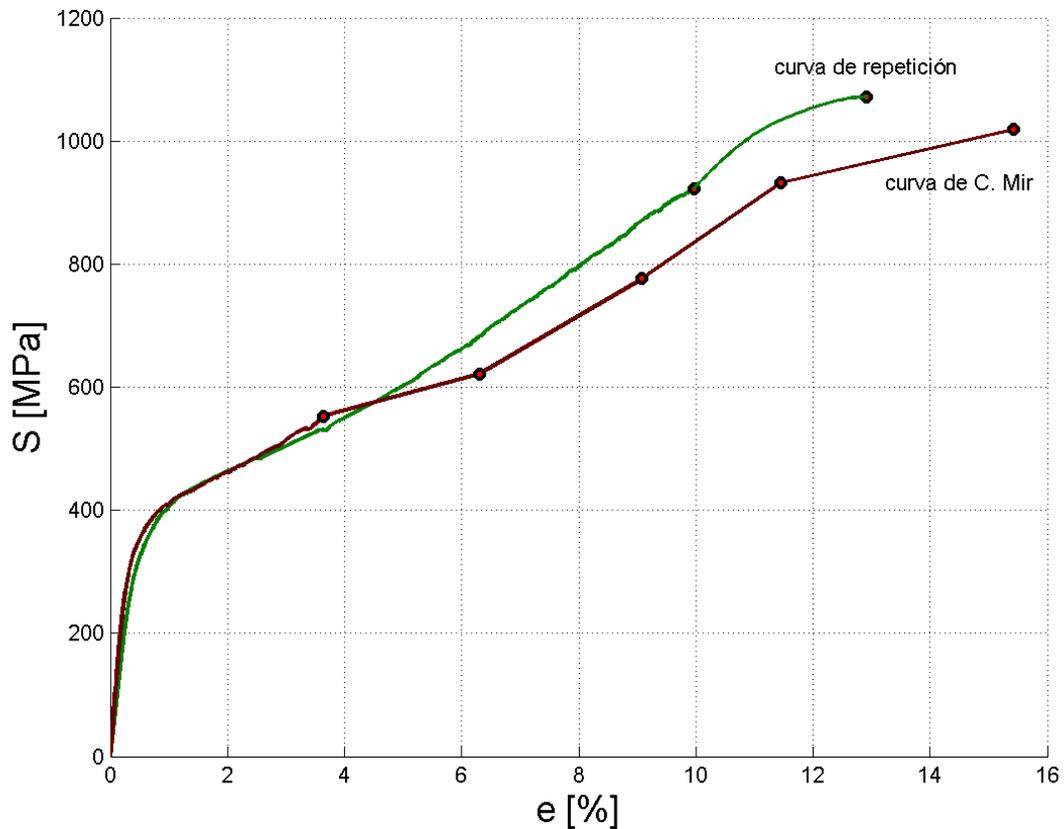


Figura 4.16: Probeta de 60  $\mu\text{m}$  ensayada en tracción a 20 °C. Se muestra también la curva obtenida por C. Mir.

*OBS En las curvas de tracción, los trazos de curvas entre circunferencias corresponden al rango de datos en que se retiró el extensómetro y se utilizó el dial mecánico*

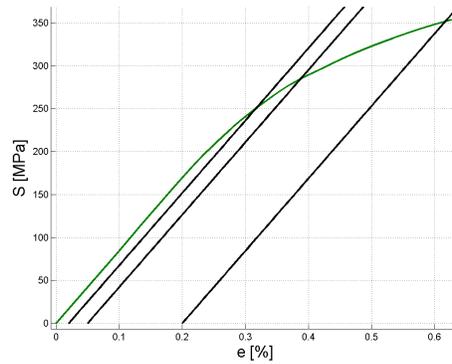


Figura 4.17: Determinación del esfuerzo de transformación.

Tabla 4.16: Parámetros curva tracción a 20 °C

Tamaño de grano $\mu\text{m}$	E [GPa]	$S_t^*$ [MPa]			Máximos	
		1	2	3	UTS [MPa]	$e_{UTS}$ [%]
60	84,3	250	285	351	1071,5	12,91

\* 1 al 0.02 %, 2 al 0.05 % y 3 al 0.2 % deformación

Las rectas utilizadas para determinar el esfuerzo de transformación se muestran en la figura 4.17. Los valores de los parámetros de la curva de tracción de C. Mir se pueden encontrar en su trabajo de memoria (ver tabla 3.1 de ref. [1]).

Se puede observar que dentro del rango de datos en que se utilizó el extensómetro las curvas son bastante coincidentes, pero en el rango de datos en que se utilizó el dial existe una gran diferencia, lo cual hace que se cuestione la validez de las medidas tomadas por el dial mecánico. Una explicación a esta diferencia es que el extensómetro mide sólo la deformación de la porción de probeta que se encuentra entre sus tenazas (25 mm), en cambio el dial mecánico está ubicado en un extremo del carro deslizante, por lo que mide la deformación del largo completo de la probeta (65 mm) más la deformación y/o ajustes de la máquina. Por lo tanto se puede concluir para este ensayo que la curva de C. Mir presenta el mismo comportamiento que el de la nueva curva hasta el retiro del extensómetro y los valores después del retiro de éste no son válidos.

### 4.3.3. Ensayos a 50 °C con probetas de 60, 100 y 200 $\mu\text{m}$

Con la realización de estos ensayos se pretende completar la serie de ensayos a la fractura realizados por C. Mir (ver tabla 1.1). Se realizaron ensayos de tracción a una temperatura nominal de 50 °C, con tres tamaños de grano: 60, 100 y 200  $\mu\text{m}$ . El ensayo con la probeta de 200  $\mu\text{m}$  se repitió una segunda vez debido a que en el primer ensayo el extensómetro se retiró muy anticipadamente.

En la figura 4.18 se muestran las curvas obtenidas y en la tabla 4.17 se presentan los parámetros característicos de ellas, donde la última columna corresponde a mediciones de deformación de la probeta medida después de la fractura.

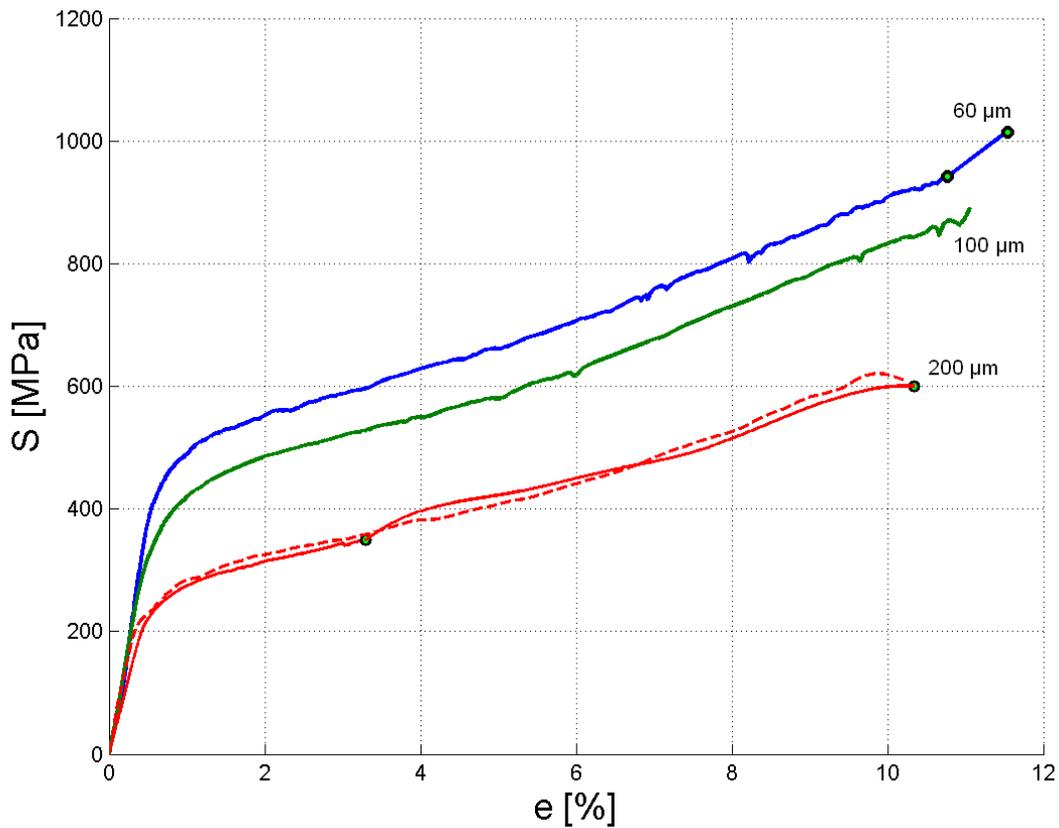


Figura 4.18: Probetas de distintos tamaños de grano ensayadas en tracción a 50 °C. La repetición con 200  $\mu\text{m}$  se muestra con línea segmentada.

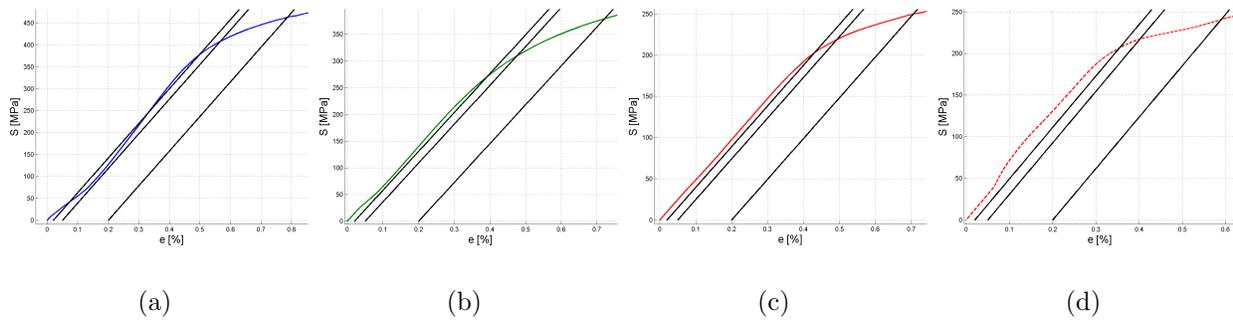


Figura 4.19: Determinación del esfuerzo de transformación, ensayo a 50 °C: a) 60  $\mu\text{m}$ ; b) 100  $\mu\text{m}$ ; c) 200  $\mu\text{m}$ , serie1; d) 200  $\mu\text{m}$ , serie2.

Tabla 4.17: Parámetros curvas de tracción a 50 °C

Grano [ $\mu\text{m}$ ]	Serie	E [GPa]	$S_t^*$ [MPa]			Máximos		
			1	2	3	UTS [MPa]	$e_{UTS}$ [%]	Def. s/c** [%]
60	1	78,91	377	408	462	1015	11,54	1.77
100	1	72,75	270	309	379	890,74	11,06	1.31
200	1	49,41	203	219	250	600,08	10,34	0.92
	2	61,76	207	217	240	610,36	10,21	-

\* 1 al 0.02 %, 2 al 0.05 % y 3 al 0.2 % deformación, \*\*sin carga

Las rectas utilizadas para determinar el esfuerzo de transformación se muestran en la figura 4.19.

Una primera distinción clara entre las curvas es que, al aumentar el tamaño de grano austenítico manteniendo la temperatura constante, el valor de  $S_t$  decrece (ver tabla 4.17), lo cual hace que las curvas se trasladen hacia abajo. Este comportamiento también fue observado en el trabajo que se presenta en la referencia [2] y se puede atribuir a que los bordes de grano actúan como barreras al cizalle martensítico [15], es decir a menor tamaño de grano mayor es la cantidad de bordes de grano y por lo tanto se requiere un mayor esfuerzo ( $S_t$ ) para comenzar la transformación martensítica inducida por esfuerzos. Los valores del UTS y  $e_{UTS}$  también presentan el mismo comportamiento y decrecen al aumentar el tamaño de grano. Otro fenómeno que se observa es el menor cambio entre las curvas de probetas de tamaño de grano de 60 y 100  $\mu\text{m}$ , con respecto al cambio entre las curvas de 100 y 200  $\mu\text{m}$ .

#### 4.3.4. Repetibilidad de los ensayos a la fractura utilizando material de aleación.

Se realizaron ensayos con probetas de tamaño de grano de  $115 \mu\text{m}$  a temperaturas de 6, 20 y 50 °C, con el propósito de observar que tan repetibles son los ensayos a la fractura a distintas temperaturas, utilizando material de aleación. Para ello se realizaron 2 ensayos a cada temperatura y se analizaron las curvas obtenidas. Para las temperaturas de 6 y 20 °C se realizó una tercera serie, debido a las diferencias encontradas entre las 2 primeras. Las curvas obtenidas se muestran en la figura 4.20, donde están agrupadas para cada temperatura. En la figura 4.21 se presentan todas las curvas y en la tabla 4.18 se presentan los parámetros característicos determinados para cada una de ellas.

Para la temperatura de 50 °C las curvas son bastante coincidentes hasta el punto de 5 % de deformación aproximadamente, de ahí en adelante se separan en forma leve y finalmente alcanzan valores máximos de esfuerzo y deformación bastante similares. Además, en la tabla 4.18 se puede comprobar también que los valores de  $E$  y  $S_t$  tienen valores muy parecidos en ambas series, por lo que se puede concluir que los ensayos a 50 °C si son repetibles.

Las dos primeras curvas de tracción obtenidas a 6 °C son bastante disímiles y sus curvas se separan antes de alcanzar el valor 1 % de deformación y alcanzan valores máximos de esfuerzo y deformación muy diferentes, aunque en el tramo 0 a 1 % las curvas se parecen bastante y sus valores de  $E$  y  $S_t$  son muy parecidos, como se puede ver en la tabla de parámetros. La tercera serie a 6 °C se asemeja más a la primera hasta alrededor del punto 5 % de deformación, sin embargo de ahí en adelante se separa, alcanzando valores máximos de esfuerzo y deformación mayores, más parecidos a los alcanzados por la segunda serie.

Para la temperatura de 20 °C, las dos primeras series son muy diferentes, estando la segunda siempre debajo de la primera. Presentan diferencias notables en los valores de esfuerzo de transformación y valores máximos, sólo presentan un módulo elástico similar. La tercera serie también resultó muy diferente, aunque su valor de  $S_t$  se asemeja en gran medida al valor de la primera serie.

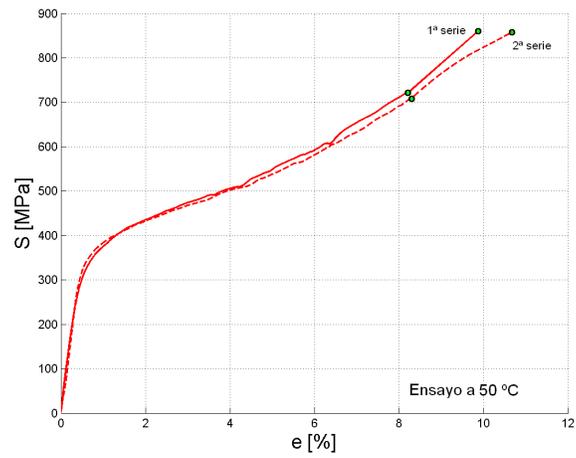
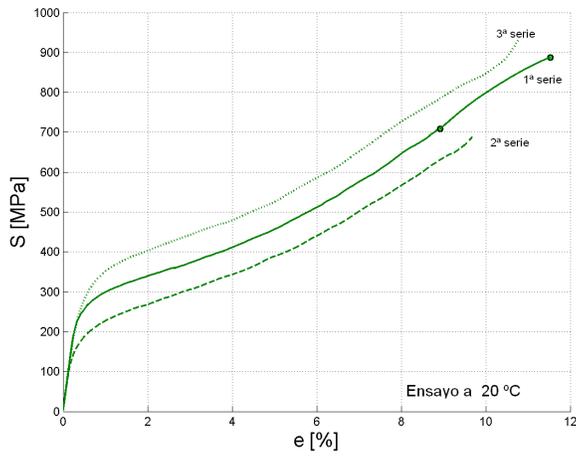
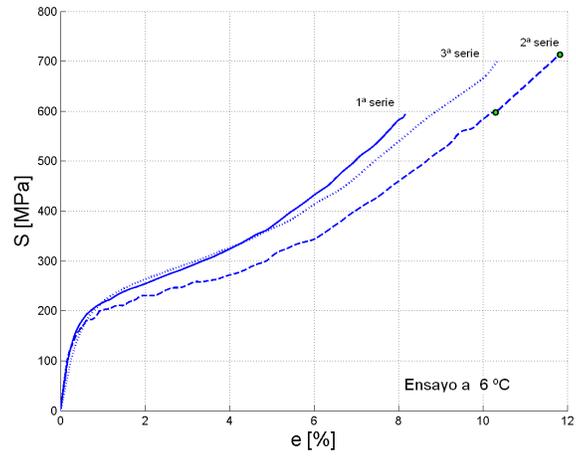


Figura 4.20: Probetas de 115  $\mu\text{m}$  ensayadas en tracción a: a) 6 °C; b) 20 °C; c) 50 °C.

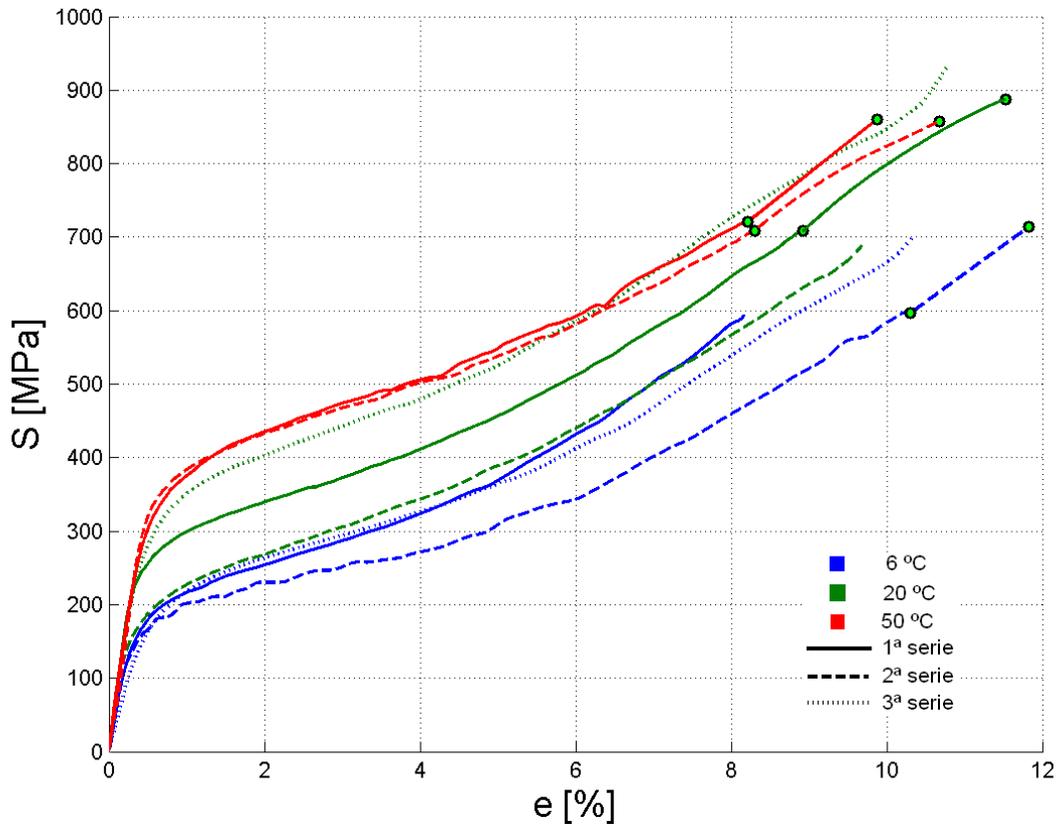


Figura 4.21: Probetas de 115  $\mu\text{m}$  ensayadas en tracción.

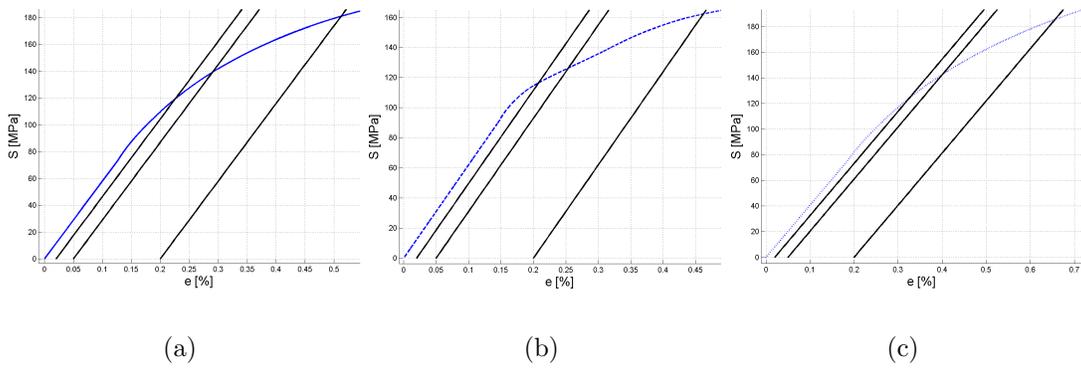


Figura 4.22: Esfuerzo de transformación probetas 115  $\mu\text{m}$ , 6 °C: a) serie 1; b) serie 2; c) serie 3.

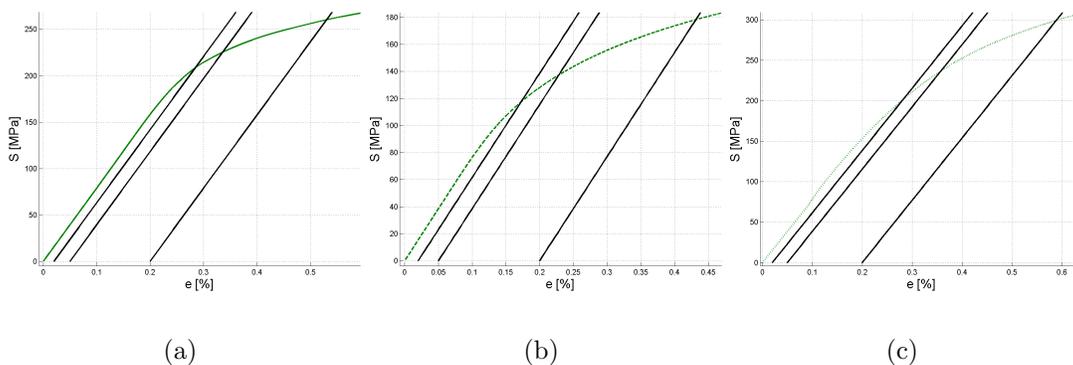


Figura 4.23: Esfuerzo de transformación probetas 115  $\mu\text{m}$ , 20 °C: a) serie 1; b) serie 2; c) serie 3.

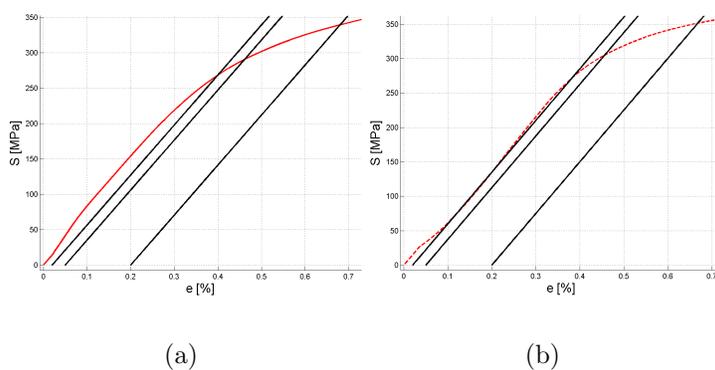


Figura 4.24: Esfuerzo de transformación probetas 115  $\mu\text{m}$ , 50 °C: a) serie 1; b) serie 2.

Tabla 4.18: Parámetros curvas tracción probetas de 115  $\mu\text{m}$

Temp. Nom. [° C]	Serie	E [GPa]	$S_t^*$ [MPa]			Máximos	
			1	2	3	UTS [MPa]	$e_{UTS}$ [%]
6	1	57,97	119	140	181	594,54	8,17
	2	61,97	117	126	162	713,66	11,83
	3	40,65	124	143	186	702,77	10,36
20	1	78,83	208	225	260	887,58	11,53
	2	77,01	118	137	178	688,55	9,69
	3	76,9	202	237	299	933,08	10,79
50	1	70,68	268	291	339	860,08	9,88
	2	75,03	272	305	351	857,68	10,68

\* 1 al 0.02%, 2 al 0.05% y 3 al 0.2% deformación

Las rectas utilizadas para determinar el esfuerzo de transformación de las curvas, se muestran en las figuras 4.22, 4.23 y 4.24.

En la figura 4.25 se muestra la dependencia de  $S_t$  con la temperatura, para cada serie. Se ve lo que se ha encontrado en casi todos los ensayos anteriores a temperatura variable:  $S_t$  crece al aumentar la temperatura.

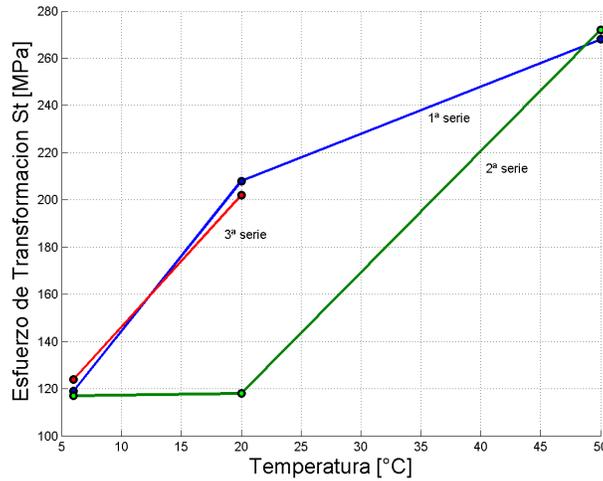


Figura 4.25: Variación de  $S_t$  con la temperatura, para las 3 series indicadas.

Usando el método de la línea interceptada (ver sección 3.2.4) se les midió el grano post-ensayo a las probetas ensayadas a 6 y 20 °C, con el propósito de ver si es la influencia del tamaño de grano lo que determinó la diferencia encontrada en las curvas de las series 1, 2 y 3 de ambas temperaturas. Los valores encontrados se muestran en la tabla 4.19.

Tabla 4.19: Mediciones de grano post-ensayo, probetas ensayadas en tracción a 6 y 20 °C.

Temperatura de ensayo	6 °C			20 °C		
Serie	1	2	3	1	2	3
Tamaño de grano [ $\mu\text{m}$ ]	135,6	125,9	153,1	113,8	125,1	106,9

Para las probetas ensayadas a 20 °C el orden en que aumenta el tamaño de grano post-ensayo según la serie es 3, 1 y 2. De acuerdo a lo encontrado anteriormente en los ensayos con tamaño de grano variable y temperatura constante es que  $S_t$  decrece con el aumento del tamaño de grano. Este comportamiento es predominantemente el que se observa para los valores de  $S_t$  de las curvas a 20 °C y además éstas se trasladan hacia abajo en el orden de

las series 3, 1 y 2, como se puede ver en las figuras 4.21 y 4.20. En conclusión, gran parte de las diferencias encontradas en las series a 20 °C se justifica en la dispersión de los tamaños de grano de las probetas utilizadas.

En el caso de las curvas a 6 °C, las diferencias encontradas no se pueden atribuir a la dispersión en el tamaño de grano ya que no se observan diferencias notables en los valores de  $S_t$  (valor 1) para las tres series y las diferencias de las curvas comienzan después de alcanzado el esfuerzo de transformación. Sin embargo un factor clave que se debe tener en cuenta es que en promedio se tiene aproximadamente tres granos en el diámetro de la probeta, lo cual influye en que el material no presente isotropía por compensación, lo cual implica tener diferentes propiedades mecánicas. Además, a temperaturas bajas como 6 °C se está muy cerca de los valores de  $M_s$  informados, por lo que la estabilidad de la austenita es discutible.

### 4.3.5. Análisis del conjunto completo de curvas tracción

En las secciones anteriores se ha presentado una serie de ensayos a la fractura realizados a distintas temperaturas y con distintos tamaños de grano. Con estos ensayos más los realizados por C. Mir se puede hacer un análisis global de las curvas de tracción, observando la influencia de la temperatura y el tamaño de grano. En la tabla 4.20 se muestra un resumen de los ensayos realizados en esta memoria, más los realizados por C. Mir.

Tabla 4.20: Resumen de ensayos de tracción realizados

Temperatura °C	Tamaño de grano [ $\mu\text{m}$ ]			
6	60 (C. Mir)	100 (C. Mir)	115	200 (C. Mir)
20	60	100 (C. Mir)	115	200 (C. Mir)
50	60	100	115	200

En la figura 4.26 se muestra el conjunto de curvas en dos columnas de recuadros: en cada recuadro de la primera columna se mantiene fijo el tamaño de grano (el gráfico para  $115 \mu\text{m}$  se muestra en la figura 4.27) indicado y se muestran las curvas para las tres temperaturas, lo que permite observar la influencia de la temperatura; en cada recuadro de la segunda columna se mantiene fija la temperatura indicada y se muestran las curvas para los cuatro tamaños de grano (los valores entre paréntesis son los valores reales medidos post-ensayo), lo que permite observar la influencia del tamaño de grano. Las curvas con tamaño de grano  $115 \mu\text{m}$  son las de la sección anterior (las series usadas:  $6 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1ª serie;  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 3ª serie y  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , 2ª serie). El tramo de las curvas después del retiro del extensómetro (tramo entre las circunferencias) se ha modificado, trazando una curva aproximada, utilizando sólo los valores de esfuerzo, ya que las mediciones con el dial mecánico no son reales.

En la tabla 4.21 se muestran los valores del esfuerzo de transformación de todas las curvas. Los valores de  $S_t$  de las curvas de C. Mir fueron sacados de la tabla 3.1 de ref. [1]. En la figura 4.28 se muestra en forma gráfica la evolución de  $S_t$  con la temperatura y el tamaño de grano.

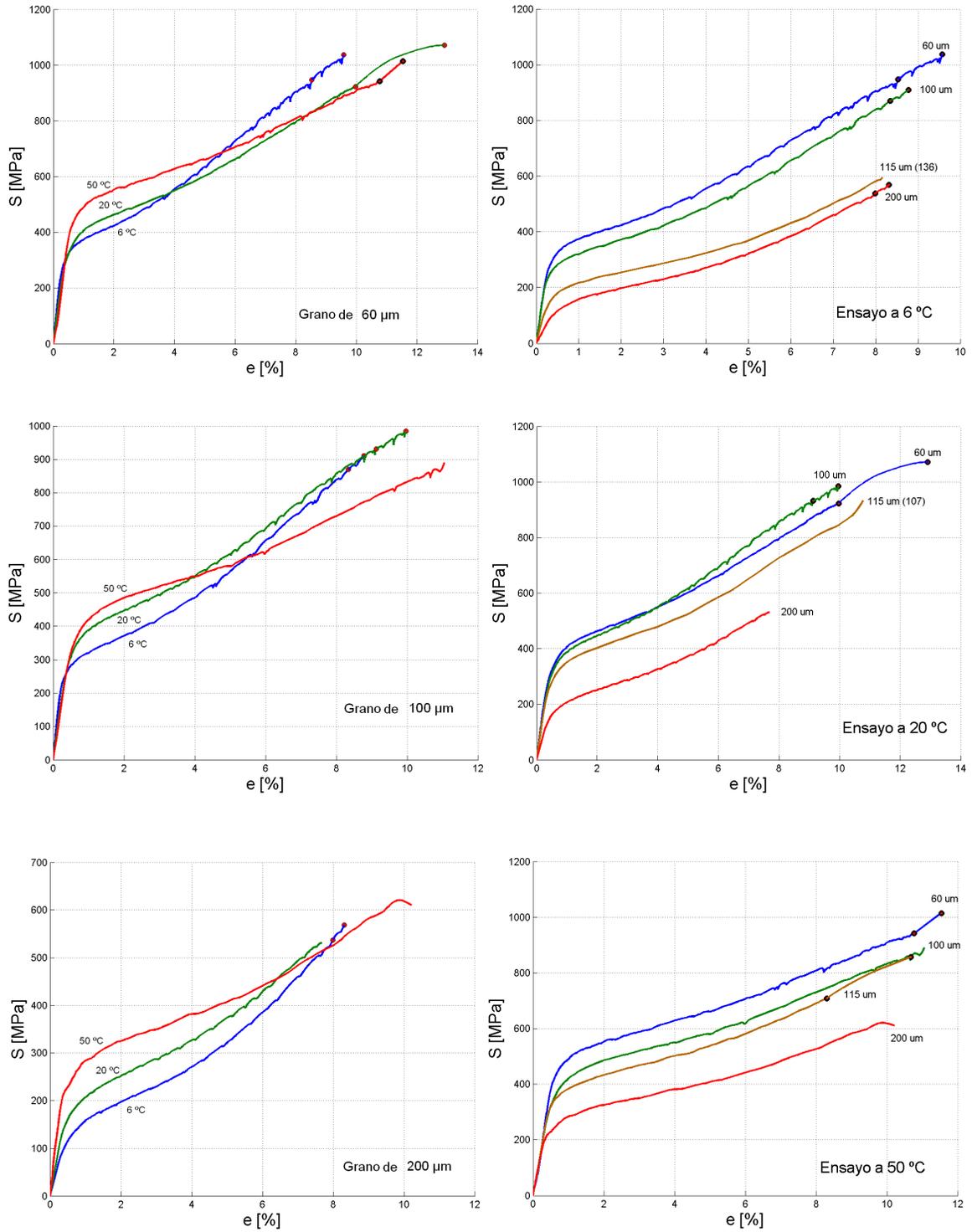


Figura 4.26: Influencia de la temperatura y el tamaño de grano en ensayos a la fractura.

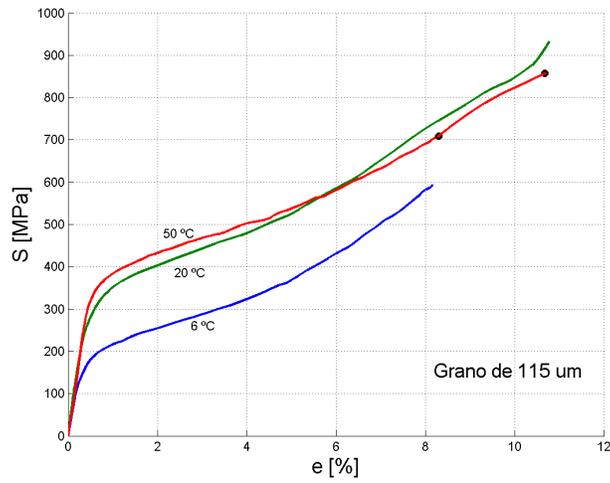
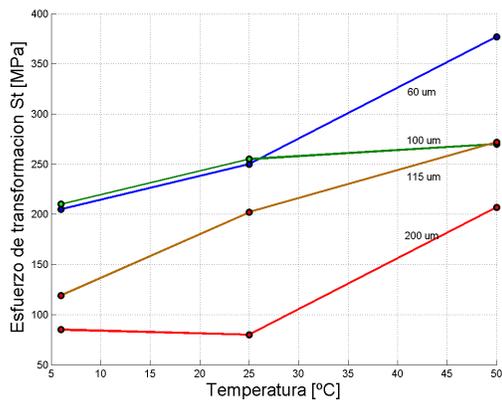


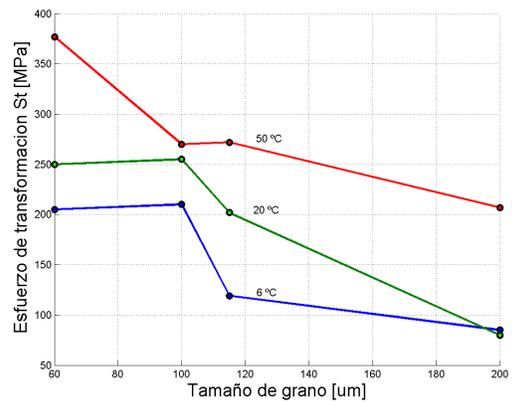
Figura 4.27: Influencia de la temperatura para 115 μm.

Tabla 4.21: Esfuerzo de transformación [MPa] del conjunto de curvas tracción

Temperatura °C	Tamaño de grano [μm]			
	60	100	115	200
6	205	210	119	85
20	250	255	202	80
50	377	270	272	207



(a)



(b)

Figura 4.28: Variación de  $S_t$ : a) con la temperatura, b) con el tamaño de grano.

Del análisis de las curvas de tracción y sus parámetros se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. Al mantener fijo el tamaño de grano y aumentar la temperatura, los valores de  $S_t$  aumentan, con lo cual las curvas se trasladan hacia arriba en el rango aproximado de 0 a 5 % de deformación. Este predominante aumento de  $S_t$  con la temperatura (figura 4.28 (a)) se explica por el hecho de que, a mayor temperatura, la fase madre austenita se hace más estable y por consiguiente se requiere un mayor esfuerzo para comenzar la transformación martensítica inducida por esfuerzos.
2. Por otro lado, al mantener fija la temperatura y aumentar el tamaño de grano, los valores de  $S_t$  decrecen (figura 4.28 (b)), con lo cual las curvas se trasladan hacia abajo. Este comportamiento radica en lo ya explicado anteriormente y es que los bordes de grano actúan como barreras al cizalle martensítico [15].
3. Se observa en la primera columna (influencia de la temperatura), que las curvas se separan solamente en un primer rango, hasta aproximadamente 5 % de deformación, luego de lo cual se cruzan y/o tienden nuevamente a juntarse, es decir pareciera que el efecto de la temperatura es solamente en ese rango. Una explicación a este fenómeno es la siguiente: en un material clásico (que no presente el efecto superelástico) la influencia de la temperatura es aumentar el límite de fluencia [17], pero este efecto no es importante ante pequeños cambios, por ejemplo, la curva de tracción de un acero a 10 °C no se diferencia notablemente de la curva obtenida a 50 °C. Por otra parte, en una probeta de aleación, después de sobrepasar el límite superelástico superior ( $\approx$  2-3 %) toda o un gran porcentaje de la austenita se habrá transformado a martensita, pero la martensita no es una estructura superelástica, es un material clásico, es decir el aumento de la temperatura no debería tener un efecto notable en su curva, a diferencia del tramo inicial en donde un aumento de temperatura estabilizará la austenita y aumentará el esfuerzo de transformación, que a su vez traslada la curva hacia arriba. En conclusión, el comportamiento observado se debe a que la temperatura afecta sólo en el rango superelástico y no el rango posterior, donde la curva corresponde a la de un material (fase) clásico, como la martensita.
4. En la misma línea de la idea anterior, en la segunda columna de recuadros (influencia del tamaño de grano) se observa que la separación de las curvas es claramente hasta el final, al menos en dos de los tres casos. La explicación en este caso es la siguiente:

el tamaño de grano si tiene influencia en la curva de tracción de un material clásico [15] (el límite de fluencia aumenta al afinar el tamaño de grano), es decir después de haber sobrepasado el límite superior superelástico, cuando se tenga sólo martensita, el efecto del tamaño de grano aún se debe mantener, lo que se traduce en la separación de las curvas hasta el final. En conclusión, el comportamiento observado se debe a que el tamaño de grano afecta tanto el rango superelástico, como el rango posterior.

También se puede notar que, al aumentar el tamaño de grano a temperatura constante, el UTS decrece, en tanto que al aumentar la temperatura, a tamaño de grano constante, no hay una tendencia de variación clara. En la referencia [2] se explica que este es un comportamiento clásico, que se puede asociar a que en la zona final de la curva de tracción, cuando ya el material es principalmente martensítico, se está mucho más allá del comportamiento superelástico. Téngase presente que en un policristal metálico clásico es de esperar que el UTS aumente al afinar el tamaño de grano y que variaciones de temperatura de hasta 50°C tengan un efecto menor. También se observa que, al aumentar el tamaño de grano, a temperatura constante, la  $e_{UTS}$  decrece, en tanto que al aumentar la temperatura, a tamaño de grano constante, la  $e_{UTS}$  no presenta una tendencia predominante.

En general en los ensayos a la fractura, las probetas se rompieron sin estricción y consecuentemente las curvas de tracción no presentaron una zona decreciente en su parte final, esto a diferencia de la curva de la probeta de acero que si presentó dicha zona (figura 4.14).

#### 4.3.6. Ensayos de probetas previamente cicladas

Estos ensayos se realizaron con probetas que previamente fueron ensayadas cíclicamente, según se describe en la sección 4.4.3. Los ensayos se realizaron a 20 y 50 °C nominales y se utilizaron probetas de 60  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  y 200  $\mu\text{m}$ , por lo que en total se realizaron 6 ensayos. Con la realización de estos ensayos se pretende observar si una curva de tracción de una probeta sin previo historial de ensayo es la misma que la de una probeta con historial, como los ensayos cíclicos previos de este caso.

En las figuras 4.29 y 4.30 se muestran las seis curvas de tal forma de poder observar la influencia de la temperatura y el tamaño de grano respectivamente. En la figura 4.31 se presentan las seis curvas en un solo recuadro y en la tabla 4.22 se presentan sus parámetros.

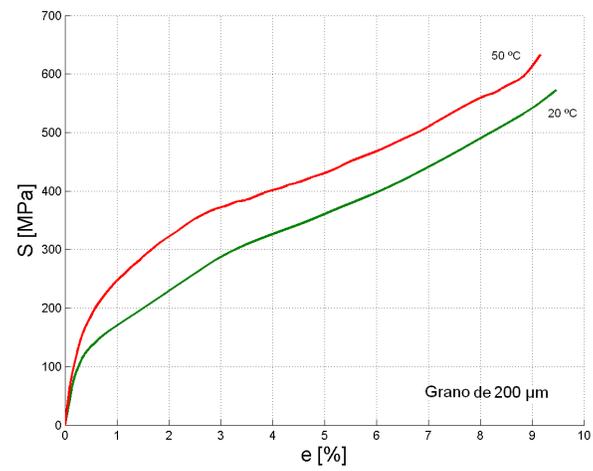
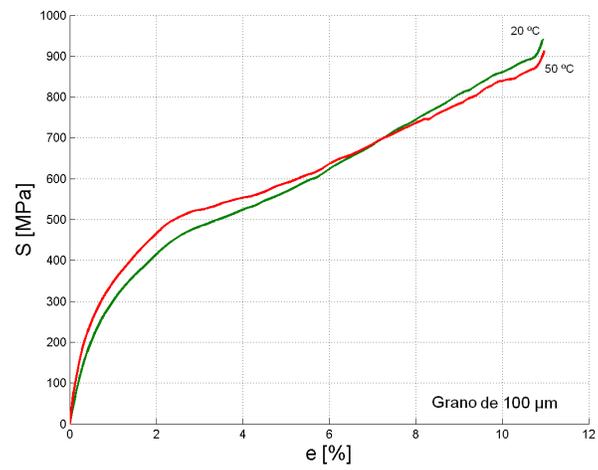
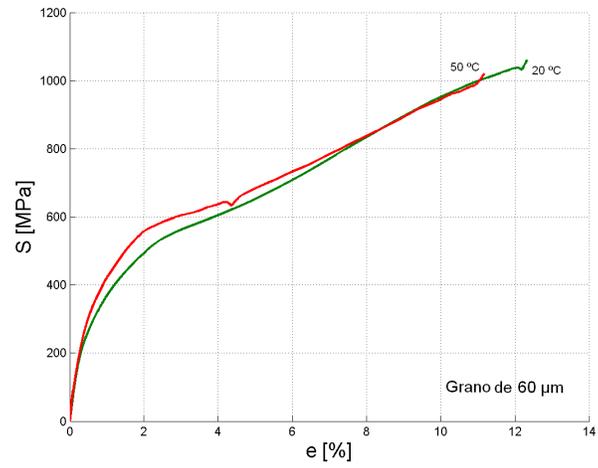


Figura 4.29: Influencia de la temperatura en las curvas de tracción de probetas previamente cicladas.

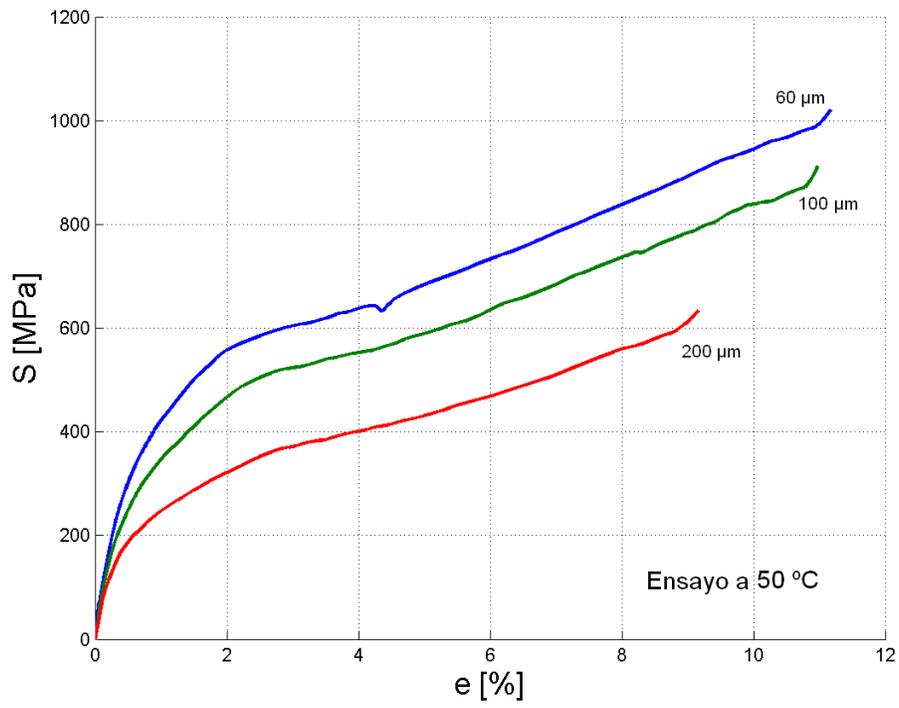
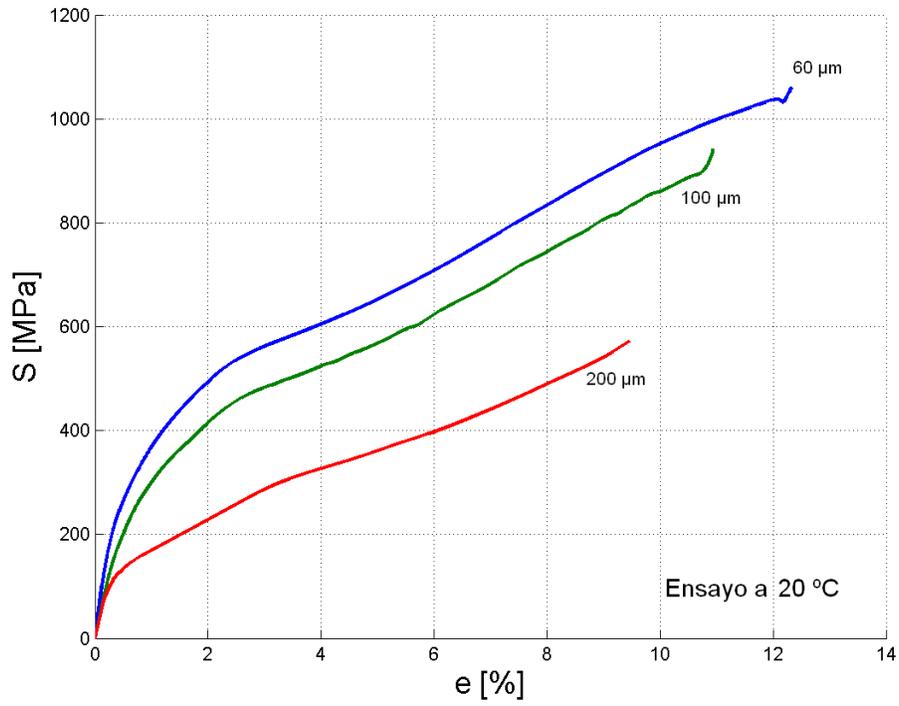


Figura 4.30: Influencia del tamaño de grano en las curvas de tracción de probetas previamente cicladas.

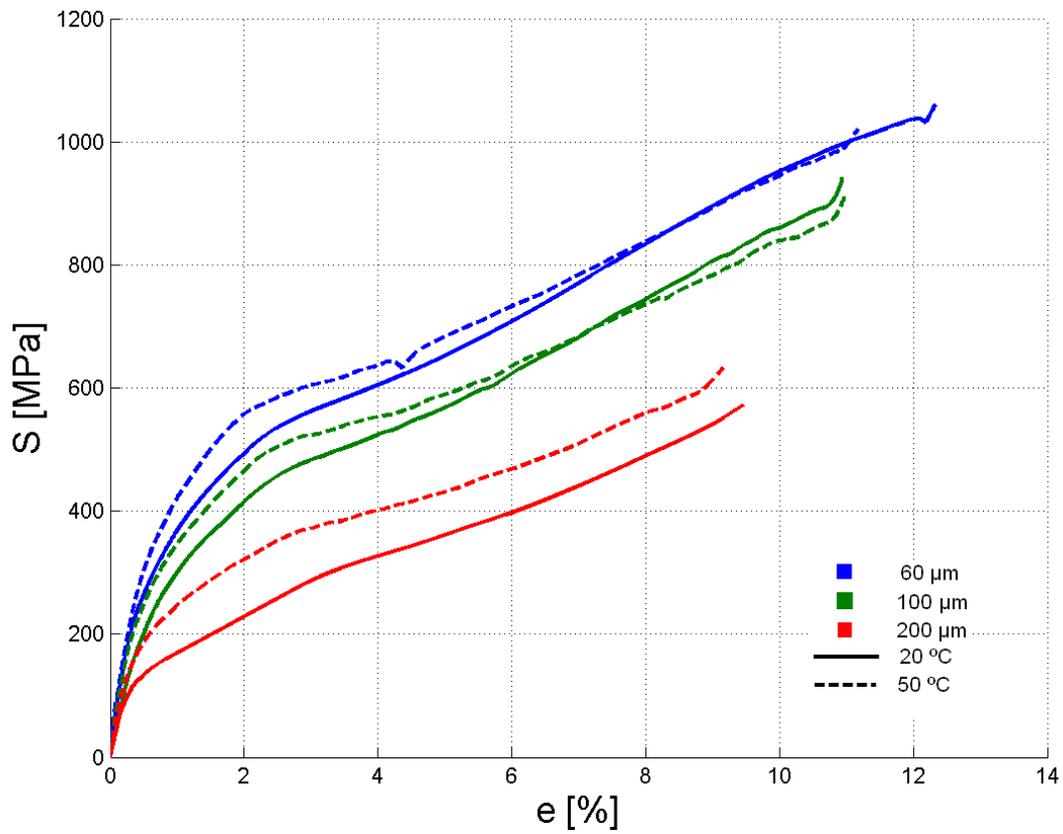


Figura 4.31: Curvas de tracción de probetas previamente cicladas, en términos de los parámetros temperatura y tamaño de grano indicados.

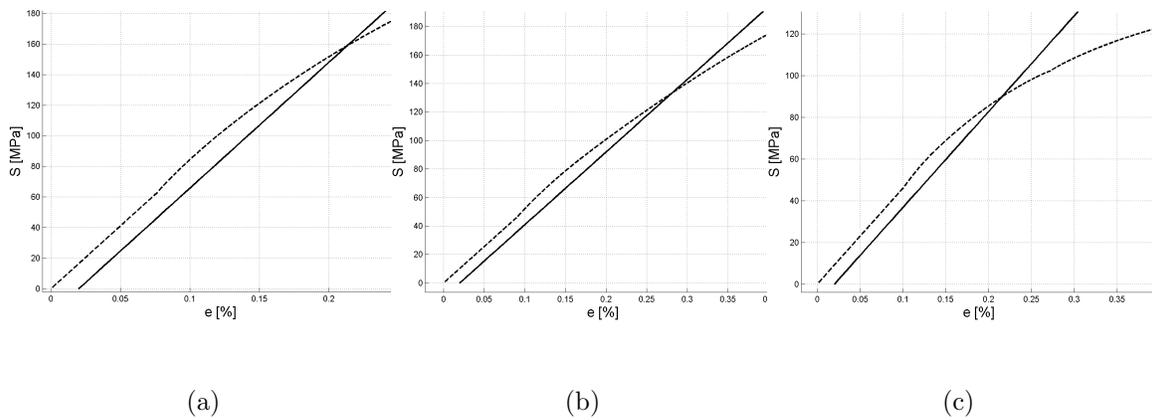


Figura 4.32: Determinación de esfuerzo de transformación probetas ensayadas a 20 °C: a) 60  $\mu\text{m}$ ; b) 100  $\mu\text{m}$ ; c) 200  $\mu\text{m}$ .

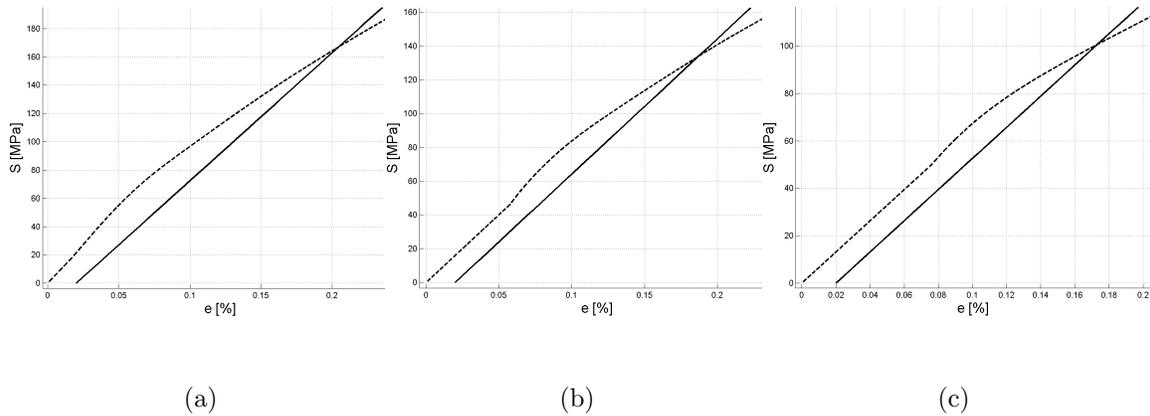


Figura 4.33: Determinación de esfuerzo de transformación probetas ensayadas a 50 °C: a) 60  $\mu\text{m}$ ; b) 100  $\mu\text{m}$ ; c) 200  $\mu\text{m}$ .

Tabla 4.22: Parámetros de las curvas de tracción de probetas previamente cicladas.

Temperatura [°C]	Grano [ $\mu\text{m}$ ]	E [GPa]	$S_t$ * [MPa]	Máximos	
				UTS [MPa]	$e_{UTS}$ [%]
20	60	82,29	159	1060	12,33
	100	51,07	133	941,61	10,94
	200	46,02	90	572,45	9,47
50	60	90.46	167	1020	11,17
	100	80,13	134	912,7	10,97
	200	65,71	101	633,11	9,16

\* al 0.02 % deformación

Las rectas utilizadas para determinar el esfuerzo de transformación se muestran en la figura 4.32 y 4.33.

El comportamiento de las curvas con la temperatura y el tamaño de grano es el mismo que aquel observado en las curvas de tracción sin historial de ensayos previos, presentadas en la sección anterior. Al aumentar la temperatura el esfuerzo de transformación aumenta como se puede ver en la figura 4.34 (a) y consiguientemente todas las curva se trasladan hacia arriba, en el rango 0 a 6 % aproximadamente. Al aumentar el tamaño de grano el esfuerzo de transformación decrece como se puede ver en la figura 4.34 (b) y también todas las curvas se trasladan hacia abajo. La influencia de la temperatura es sólo en el rango inicial (figura 4.29) y después las curvas tienden a juntarse (al menos en dos de los tres casos), al contrario de la

influencia del tamaño de grano que se observa a lo largo de toda la curva. Las explicaciones a estos cuatro hechos son las mismas dadas en la sección anterior.

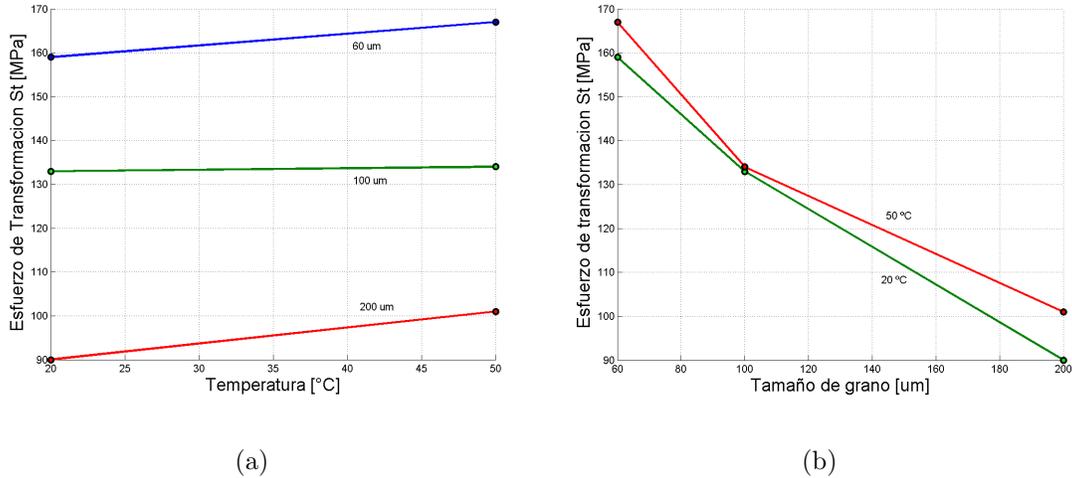


Figura 4.34: Variación de  $S_t$ : a) con la temperatura, b) con el tamaño de grano.

Los valores máximos de esfuerzo y deformación UTS y  $e_{UTS}$  respectivamente, crecen al disminuir el tamaño de grano y mantener la temperatura constante, en cambio al mantener el tamaño de grano constante y variar la temperatura no se observa una tendencia definida.

En el caso de los valores del módulo de elasticidad austenítico  $E$ , se puede observar que existe una gran variabilidad y la tendencia es a crecer con el aumento de la temperatura y a decrecer con el aumento del tamaño de grano. Como se mencionó anteriormente, el valor de  $E$  depende exclusivamente de las fuerzas de enlace atómico del material [13] y por lo tanto este comportamiento de mostrar tendencias con la temperatura y el tamaño de grano es completamente anómalo, como se explicó en la sección 4.3.1.

El efecto en el material que produce el historial o ciclado previo, se puede observar al graficar la curva de tracción de una probeta sin ciclado previo v/s la curva de una probeta que si fue ciclada. En la figura 4.35 se muestran las curvas de tracción de probetas sin historial de ensayos previos, presentadas en la sección anterior, en conjunto con las curvas que se obtuvieron en este ensayo. Se muestran en forma singular para cada temperatura y tamaño de grano indicado en cada recuadro.

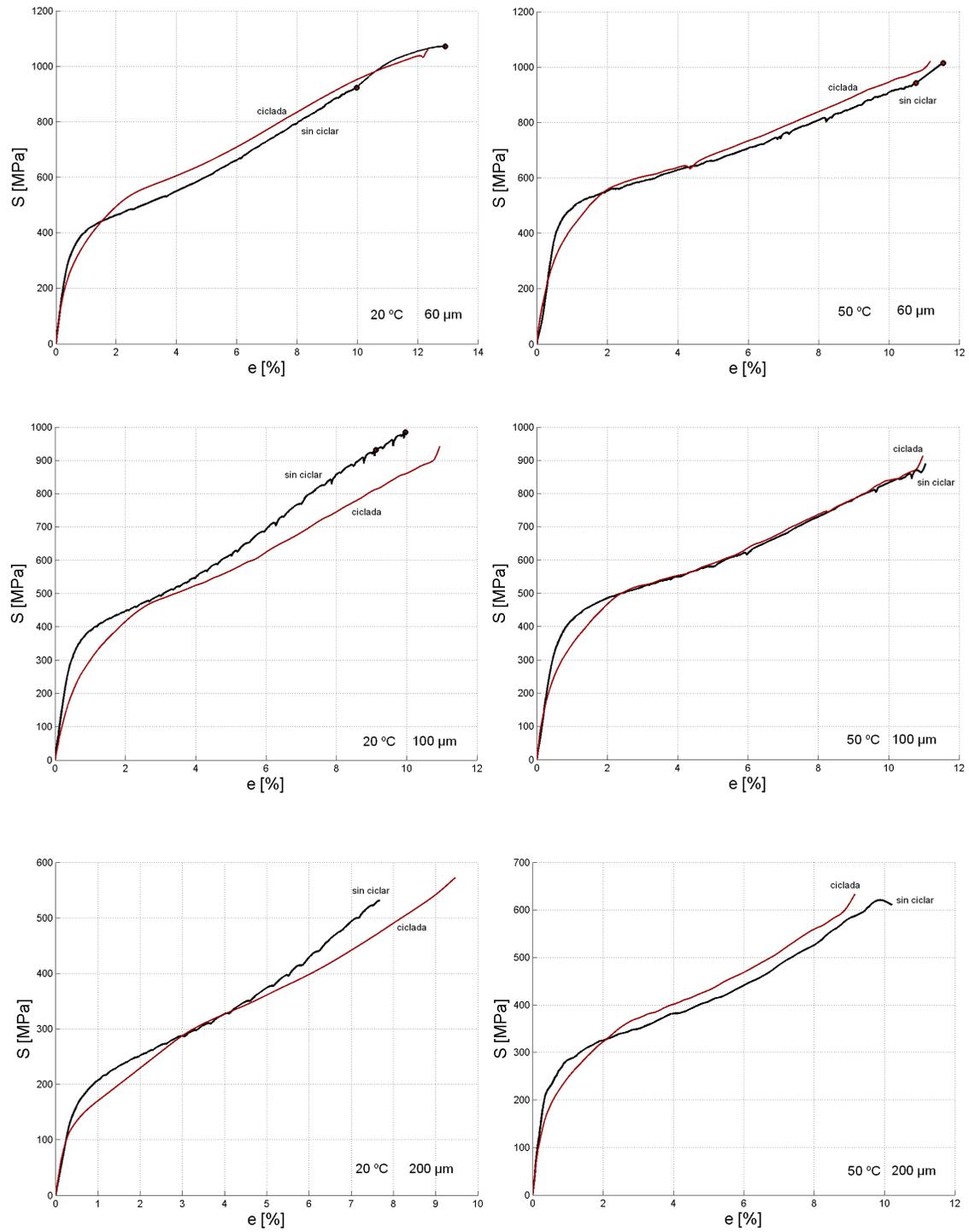


Figura 4.35: Influencia del ciclado previo en ensayos a la fractura a distintas temperaturas y tamaños de grano.

El primer efecto que se puede distinguir en forma clara es que, en el rango aproximado de 0-2% de deformación, las curvas de las probetas cicladas decaen y se encuentran por debajo de las curvas de las probetas sin ciclado previo. Este decaimiento es causado por la disminución en los valores del esfuerzo de transformación, en relación a aquellos valores mostrados por las curvas sin ciclado previo, disminución que en algunos casos sobrepasa el 50% como se puede ver en la tabla 4.23.

Como se dijo, previo al ensayo de tracción a la fractura, éstas probetas fueron ensayadas en forma cíclica a 0.8, 1.5 y 2.2% nominal. En la figura 4.87 se muestra una metalografía de una probeta ciclada a los tres porcentajes de deformación mencionados (probeta utilizada en la sección 4.4.1), en la cual se evidencia la presencia de agujas de martensita retenida. Con el propósito de explicar el decaimiento en los valores de  $S_t$ , se plantea la siguiente explicación tentativa: asumiendo que todas las probetas cicladas a 2.2% de deformación nominal, presenten martensita retenida, entonces, la caída de los valores de  $S_t$  en la curva de tracción se puede explicar debido a que, en el entorno de las agujas de martensita se genera concentración de esfuerzos internos, lo que permite que el comienzo de la transformación martensítica se adelante y comience a menores valores de esfuerzo, con el consiguiente efecto de que  $S_t$  decaiga.

Tabla 4.23: Valores de  $S_t$  [MPa] en probetas con y sin historial de ensayos.

	Temperatura [°C]	Tamaño de grano [ $\mu\text{m}$ ]		
		60	100	200
Probetas sin ciclado previo	20	250	255	80
	50	377	270	207
Probetas con ciclado previo	20	159	133	90
	50	167	134	101

Los valores para las probetas sin ciclado previo, a 20 °C para 100 y 200  $\mu\text{m}$  son los informados en el trabajo de C. Mir (ver tabla 3.1 de ref. [1]).

## 4.4. Ensayos Cíclicos

### 4.4.1. Repetición del ensayo a 2.2% deformación, con probeta de 200 $\mu\text{m}$ y temperatura variable, realizado por C. Mir.

Este ensayo tiene por objetivo verificar el resultado del ensayo cíclico realizado por C. Mir, a 2.2% de deformación nominal, con probeta de 200  $\mu\text{m}$  y temperatura variable, el cual despertaba algunas sospechas en términos del ordenamiento de sus curvas con respecto a la temperatura (ver figura 3.34 de referencia [1]).

El ensayo se realizó con una deformación nominal de 2.2%, utilizando una probeta de tamaño de grano 200  $\mu\text{m}$  y a una frecuencia de 1 Hz. La temperatura de ensayo en la cámara se varió de tal forma de realizar dos series de temperatura, es decir en la forma 50, 25, 6 y 50, 25 y 6  $^{\circ}\text{C}$ . Las curvas obtenidas se presentan ordenadas de distintas maneras, como se describe a continuación: en la figura 4.36 se muestra el ciclo 1 y 2 de las tres temperaturas y para la 1<sup>a</sup> y 2<sup>a</sup> serie de temperaturas; en la figura 4.37 se muestra el ciclo 2 y 40 de las tres temperaturas y para la 1<sup>a</sup> y 2<sup>a</sup> serie nuevamente y en la figura 4.38 se muestra la 1<sup>a</sup> y 2<sup>a</sup> serie para las tres temperaturas y para el ciclo 1, 2 y 40. En la tabla 4.24 se muestran los parámetros calculados para el ciclo 2 de cada ensayo.

Al igual que en los resultados obtenidos en las curvas de tracción, se observa que el efecto de la temperatura es trasladar las curvas hacia arriba a medida que ésta aumenta, resultado que se debe a la estabilización de la austenita con el aumento de la temperatura, lo que implica un aumento del esfuerzo de transformación con la temperatura, como se observa en la figura 4.41 (a). Este ascenso de las curvas se observa para todos los ciclos mostrados (1, 2 y 40) y para las dos series de temperaturas. Estos resultados efectivamente contradicen aquel obtenido por C. Mir, el cual mostraba que las curvas se ordenaban ascendentemente en el orden de temperaturas 25, 6 y 50  $^{\circ}\text{C}$ , además es coincidente con todos los demás obtenidos por C. Mir en los ensayos cíclicos.

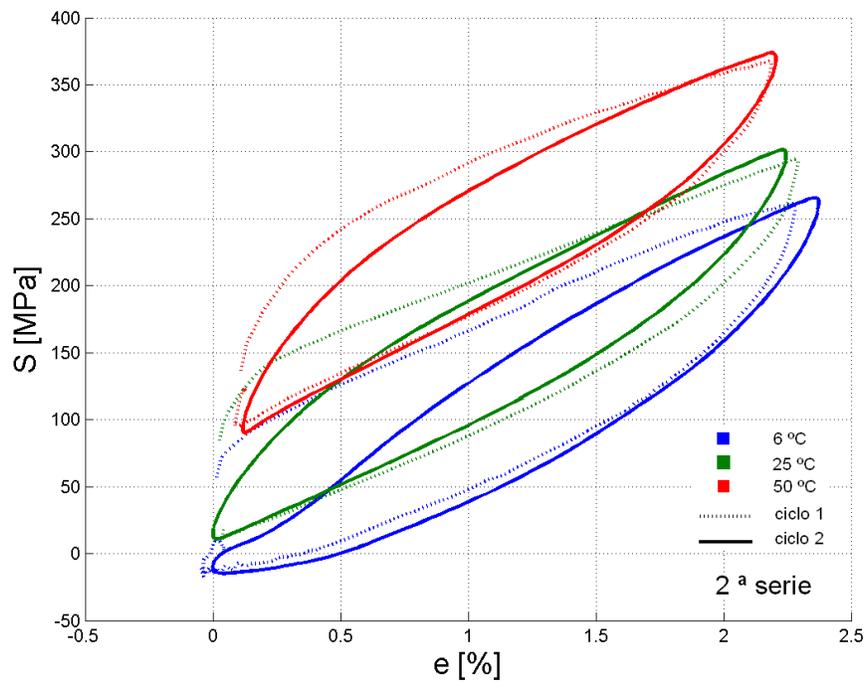
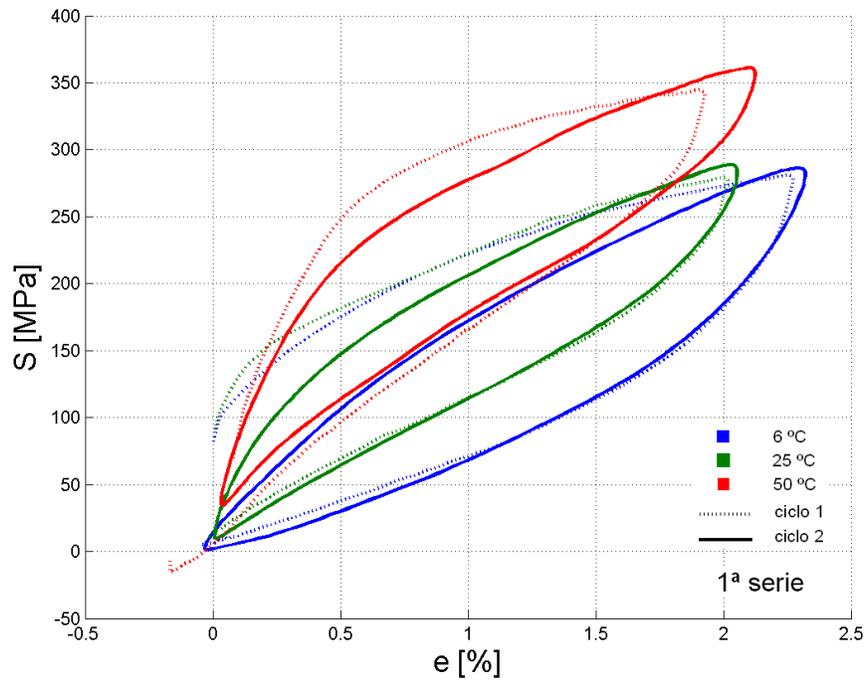


Figura 4.36: Curvas cíclicas a 2.2% y  $200 \mu\text{m}$ , en términos de la temperatura. Se muestra los ciclos 1 y 2 de la 1ª serie y 2ª serie.

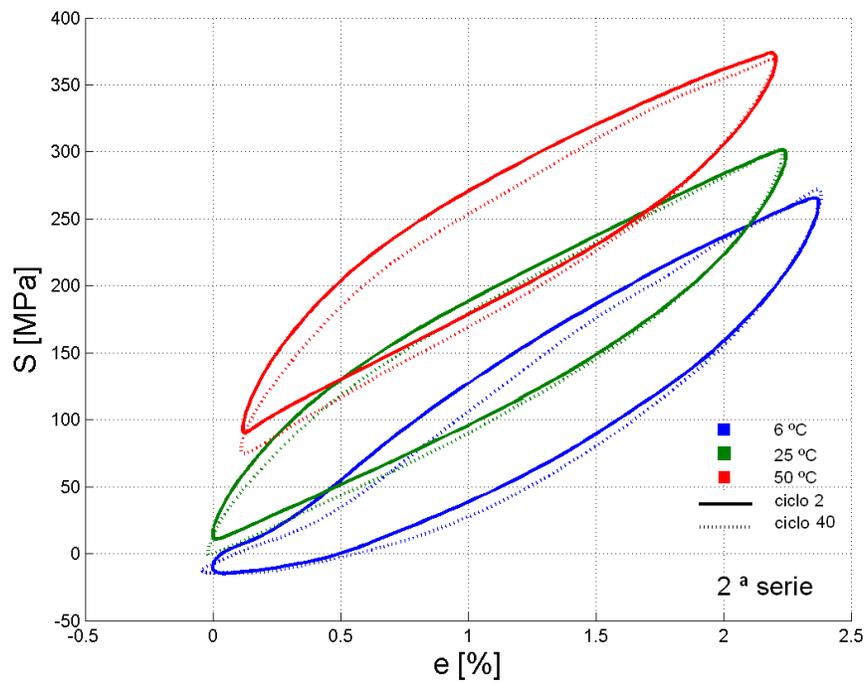
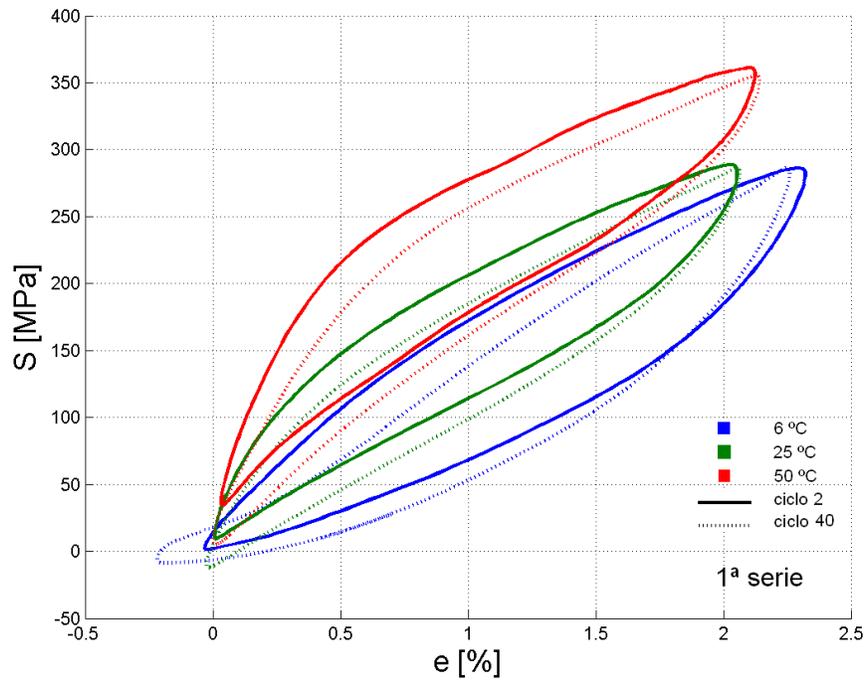


Figura 4.37: Curvas cíclicas a 2.2% y 200  $\mu\text{m}$ , en términos de la temperatura. Se muestra los ciclos 2 y 40 de la 1ª serie y 2ª serie.

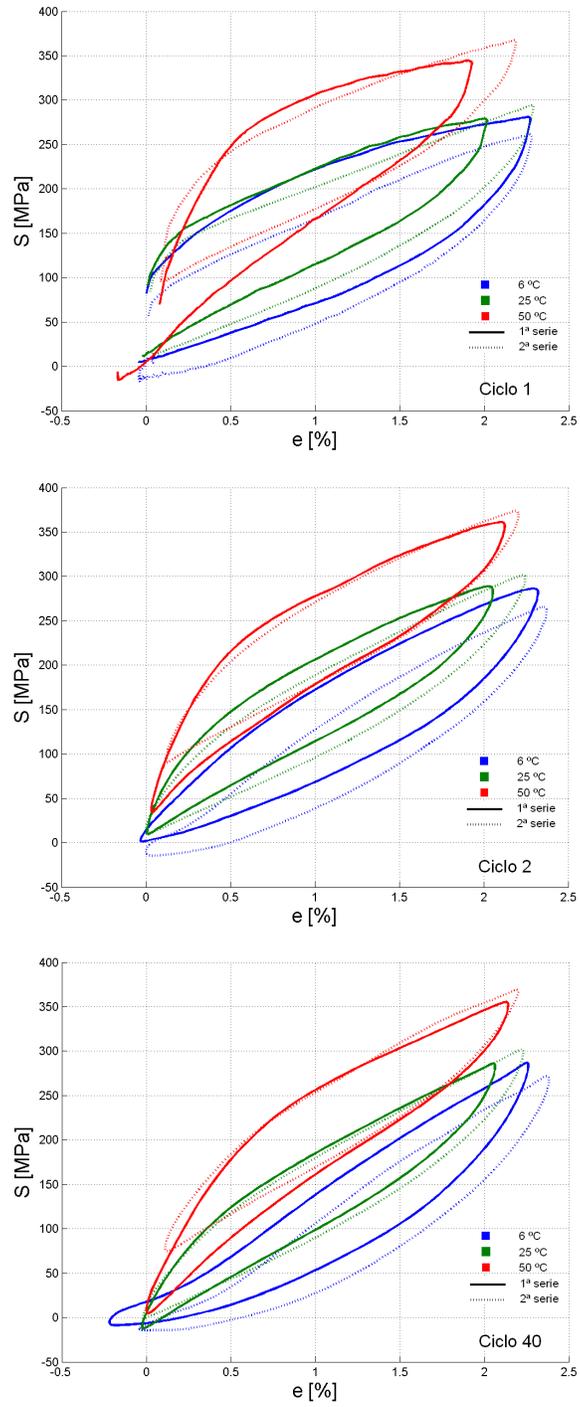


Figura 4.38: Curvas cíclicas a 2.2 % y 200  $\mu\text{m}$ , en términos de la temperatura. Se muestra la 1ª serie y 2ª serie para los ciclos 1, 2 y 40.

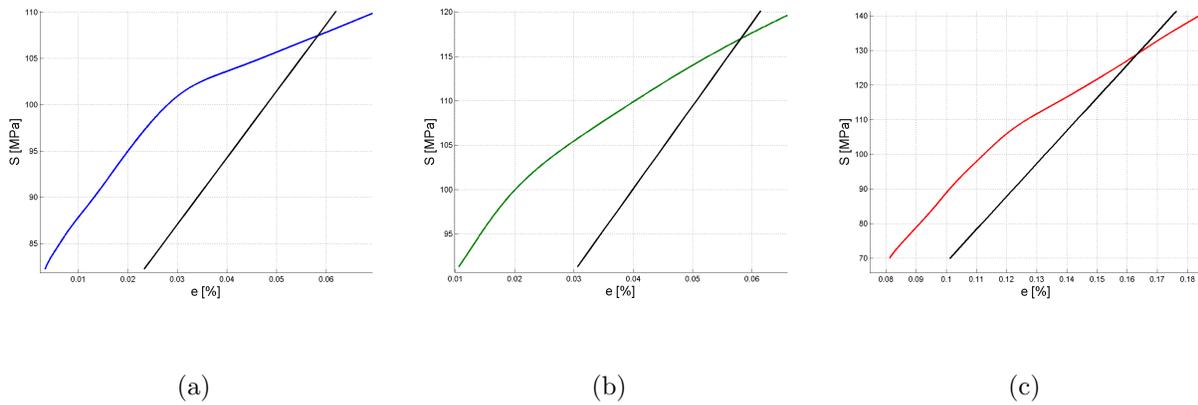


Figura 4.39: Determinación del esfuerzo de transformación del ciclo 1 de la 1ª serie: a) 6 °C; b) 25 °C; c) 50 °C.

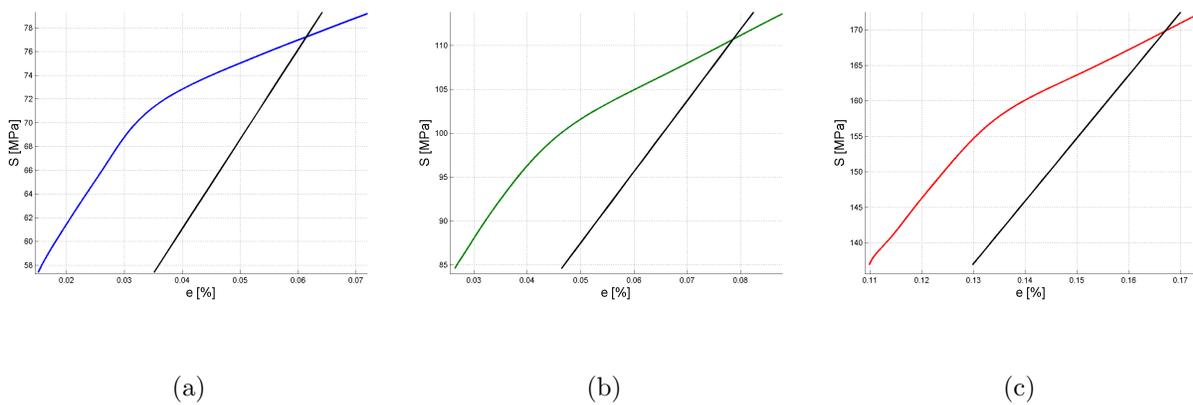


Figura 4.40: Determinación del esfuerzo de transformación del ciclo 1 de la 2ª serie: a) 6 °C; b) 25 °C; c) 50 °C.

Tabla 4.24: Parámetros curvas cíclicas a 2.2%, grano 200  $\mu\text{m}$ .

Temp. [°C]	Serie N°	$S_t$ * [MPa]	Pendientes [GPa]			Máximos		Áreas			$\xi_{Chopra}$ [%]
			E	P	R	$S_{LS}$ [MPa]	$e_{LS}$ [%]	$E_d$	$E_t$	$E_s$	
6	1	107	72	9	12	286	2,3	188	414	339	4,4
	2	77	76	9	12	266	2,4	159	336	298	4,2
25	1	117	93	8	14	289	2,1	149	403	306	3,9
	2	111	81	9	13	301	2,2	164	431	351	3,7
50	1	129	95	7	16	361	2,1	169	559	414	3,2
	2	170	88	8	14	374	2,2	152	575	484	2,5

\* al 0.02% deformación

**OBS 1** Los parámetros de las curvas de los ensayos cíclicos se determinaron, en general,

para el segundo ciclo, salvo en algunos casos que se indican, en que debido a la alta pretensión aplicada no se alcanza a observar el rango elástico inicial, en cuyo caso sólo los valores de  $E$  y  $S_t$  se determinaron en otro ciclo.

**OBS 2** Para calcular el esfuerzo de transformación en una curva cíclica, se determina el punto de mínimo esfuerzo y mínima deformación y se traza una recta de pendiente igual al tramo lineal inicial, separada 0.02 % del punto mencionado (ver figura 4.9).

Las rectas utilizadas para determinar el esfuerzo de transformación en las curvas de histéresis se muestran en las figuras 4.39 y 4.40. Los valores de  $S_t$  y  $E$  se calcularon para el primer ciclo ya que en el segundo no era factible calcularlos, debido a la alta pretensión aplicada que no permitió observar rango elástico.

Un parámetro importante es el factor de amortiguamiento  $\xi_{Chopra}$ , luego, es interesante notar el efecto de la temperatura sobre éste, lo cual se muestra en la figura 4.41 (b). Este decae al aumentar la temperatura.

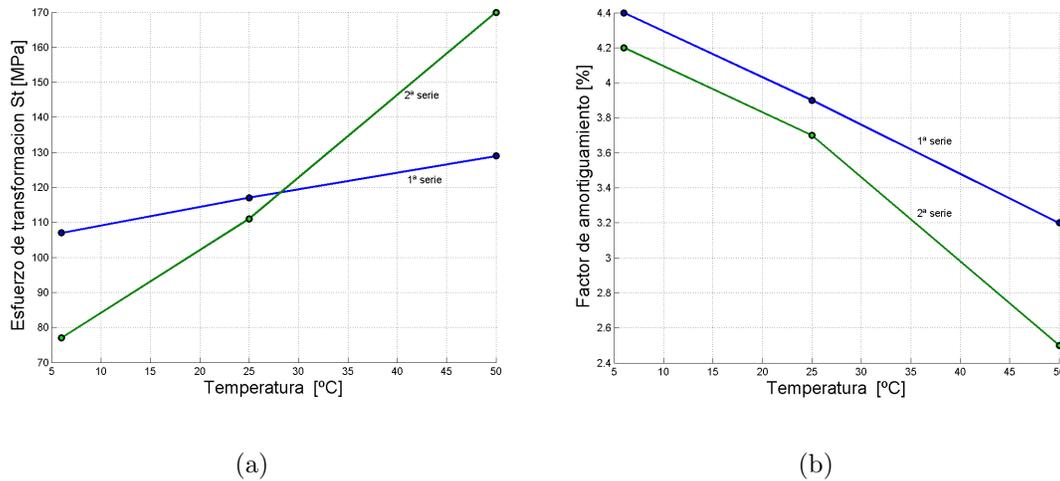


Figura 4.41: Influencia de la temperatura en: a) el esfuerzo de transformación  $S_t$ , b) el factor de amortiguamiento  $\xi_{Chopra}$ .

Otro fenómeno interesante de notar es el siguiente: los ensayos se realizaron con la combinación de levas que impone una deformación nominal de 2.2% y no se varió en ningún momento dicha combinación, sólo se variaba la temperatura entre un ensayo y otro, sin em-

bargo, en las figuras 4.36, 4.37 y 4.38 se observa que a medida que aumenta la temperatura, la tendencia es a alcanzar menores deformaciones efectivas (medidas por el extensómetro), es decir el máximo de deformación alcanzado en cada ciclo es menor. Este resultado se observa también en los ensayos a distintas temperaturas para una deformación constante y a distintos tamaños de grano para una deformación constante, de la sección 4.4.3 (ver figuras 4.59 y 4.58 respectivamente). Una explicación a este fenómeno, radica en el modelo que se describe en lo que sigue.

En la figura 3.17 se puede observar que la probeta es montada en serie con la máquina y se puede considerar que la deformación total del sistema es la suma de la deformación de la probeta más la deformación y/o ajustes de la máquina. En vista de lo anterior, la probeta y la máquina se pueden modelar como un sistema de resortes en serie de constantes  $K_{probeta}$  y  $K_{maquina}$  respectivamente, como se muestra en la figura 4.42 y la deformación total del sistema de resortes es la suma de las deformaciones de ambos resortes.

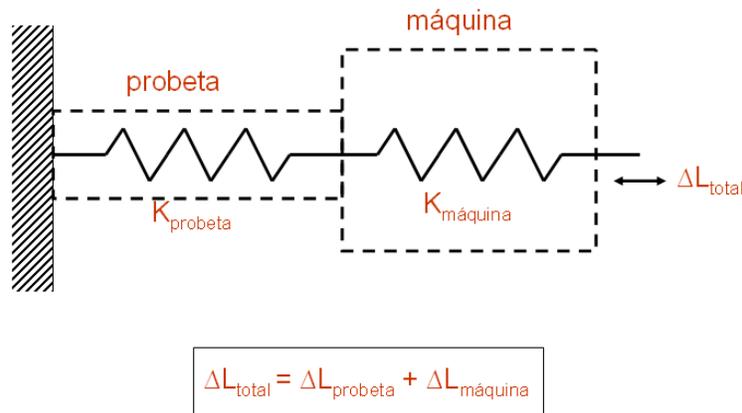


Figura 4.42: Modelo de deformación máquina-probeta.

Así, al aumentar la temperatura se sabe que el esfuerzo de transformación aumenta y hace que toda la curva se traslade hacia arriba, por lo tanto se requiere un mayor esfuerzo para deformar la probeta, es decir la probeta se hace más dura ( $K_{probeta}$  aumenta) y por lo tanto la deformación de ésta disminuye en relación a temperaturas menores, con deformación nominal fija.

#### 4.4.2. Ensayos a 25 °C, con probeta de 115 $\mu\text{m}$ y con deformación variable

Estos ensayos fueron realizados a 25 °C con probetas de tamaño de grano 115  $\mu\text{m}$ , a una frecuencia de 1 Hz y variando la deformación nominal impuesta como sigue: 0.8, 1.5 y 2.2%. Con la realización de estos ensayos se quería observar que las curvas tuvieran la misma envolvente superior, es decir que éstas se superpongan al graficar las curvas en un mismo gráfico, ya que se trata de la misma probeta ensayada a tres deformaciones. Esto, a diferencia del trabajo de C. Mir, donde la metodología empleada implicaba que al cambiar de deformación impuesta cambiaba la probeta, y las envolventes superiores de las curvas no eran coincidentes.

En la figura 4.43 se presentan las curvas obtenidas, donde se muestra el ciclo 1, 2 y 40 para las tres deformaciones. En la tabla 4.25 se muestran los parámetros característicos calculados para el ciclo 2 de cada ensayo.

Se puede observar que las envolventes superiores de las curvas no son coincidentes, para ningún ciclo (1, 2 ni 40), sin embargo se puede apreciar que las partes cercanas a los puntos de mínimo esfuerzo y deformación de las tres curvas tienden a converger a una misma curva. Otra primera observación es que las curvas se ordenan en forma ascendente al disminuir la amplitud de deformación.

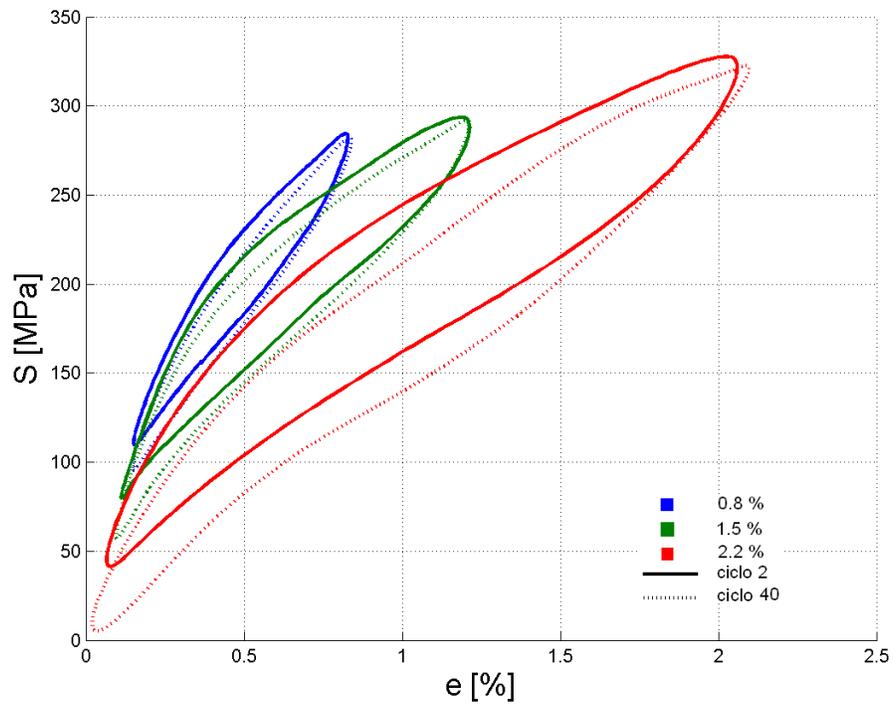
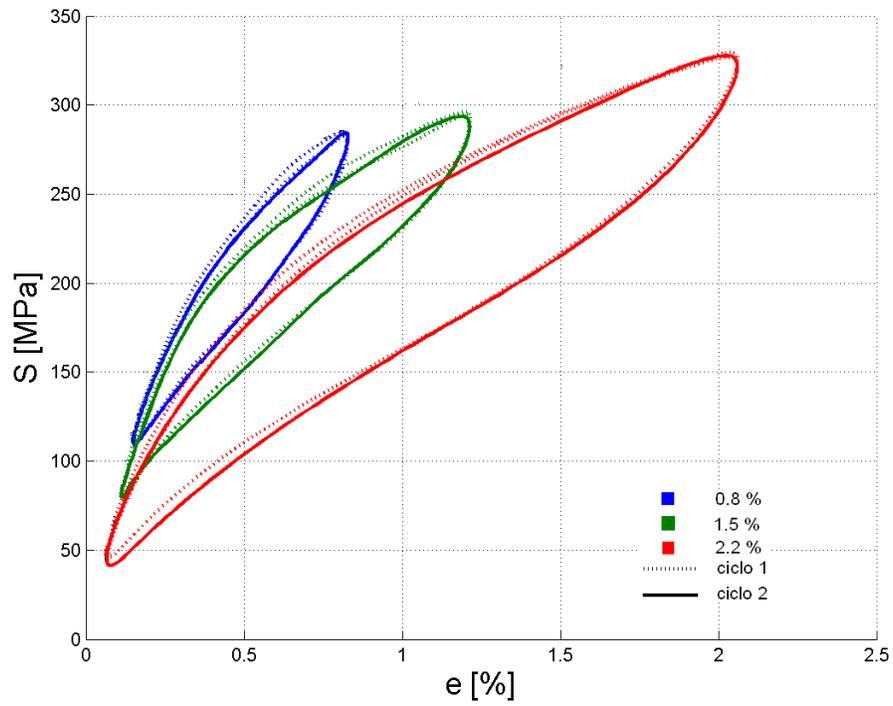


Figura 4.43: Curvas cíclicas a 25 °C, 115  $\mu\text{m}$  y a las deformaciones nominales indicadas. Se muestran los ciclos 1, 2 y 40.

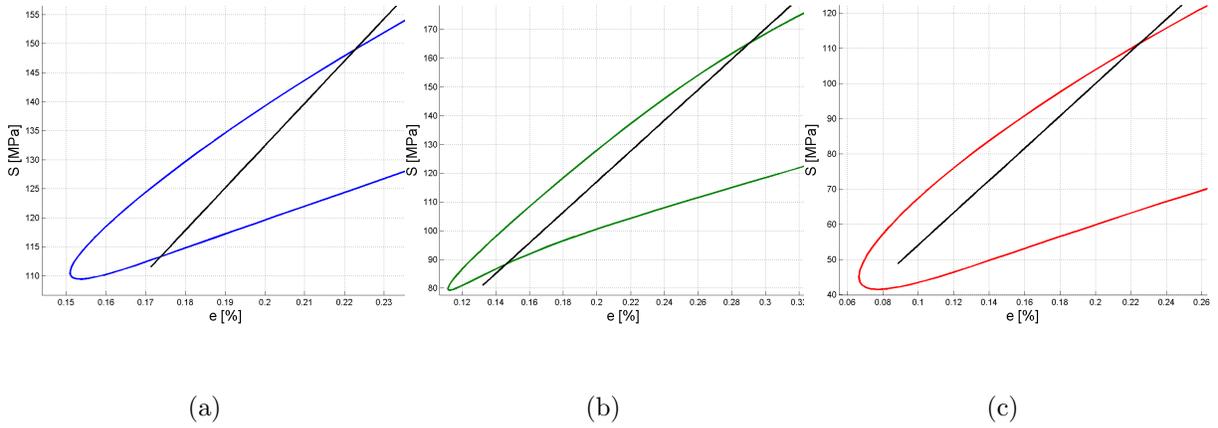


Figura 4.44: Determinación del esfuerzo de transformación: a) 0.8 %; b) 1.5 %; c) 2.2% de deformación nominal.

Tabla 4.25: Parámetros ensayos cíclicos a 25 °C, grano 115  $\mu\text{m}$ .

Def. Nominal [%]	$S_t^*$ [MPa]	Pendientes [GPa]			Máximos		Áreas			$\xi_{Chopra}$ [%]
		E	P	R	$S_{LS}$ [MPa]	$e_{LS}$ [%]	$E_d$	$E_t$	$E_s$	
0,8	149	73	17	26	284	0,8	23	148	133	1,4
1,5	165	53	11	20	294	1,2	50	249	205	1,9
2,2	111	46	8	15	328	2,1	131	469	368	2,8

\* al 0.02% deformación

Las rectas utilizadas para determinar el esfuerzo de transformación en las curvas de histéresis se muestran en la figura 4.44.

En la tabla 4.25 se puede ver que no existe una tendencia, en este caso, de  $S_t$  al aumentar la deformación nominal impuesta. El valor del factor de amortiguamiento  $\xi_{Chopra}$  aumenta al aumentar la deformación impuesta.

*OBS Todos los ensayos cíclicos que se presentan de aquí en adelante finalizaron con ensayo a la fractura.*

#### 4.4.3. Ensayos a tamaños de granos y temperaturas fijas, con deformación variable

Con la realización de los ensayos que se presentan en esta sección se tenía por finalidad usar una metodología de ensayos cíclicos diferente a aquella utilizada por C. Mir y realizar una comparación de ambos resultados en términos de las curvas obtenidas y las dependencias con la temperatura, el tamaño de grano y la deformación nominal impuesta.

La metodología empleada en el trabajo de C. Mir fue: para cada par tamaño de grano y amplitud de deformación fijos, varió la temperatura de ensayo en la forma: 0, 25, 50, 0, 25 y 50 °C. La nueva metodología utilizada consistió en fijar los parámetros de temperatura y tamaño de grano y variar la deformación nominal impuesta en 0.8, 1.5 y 2.2%. Los ensayos se realizaron a una frecuencia de 1 Hz, a temperaturas de 25 y 50 °C, utilizando probetas de tamaños de grano de 60, 100 y 200  $\mu\text{m}$ , es decir se realizaron 18 ensayos cíclicos en total, ya que para cada par de temperatura y tamaño de grano se realizaron ensayos a las tres deformaciones mencionadas. Además, después de ensayar a las tres deformaciones, la probeta fue ensayada en tracción a la fractura.

En las siguientes páginas se muestran las curvas cíclicas obtenidas y sus parámetros característicos, para cada par de temperatura y tamaño de grano. Las curvas obtenidas en los ensayos de tracción a la fractura, junto con sus parámetros se presentaron anteriormente en la sección 4.3.4.

En la figura 4.45 se muestran las curvas obtenidas en los ensayos realizados a 25 °C, utilizando una probeta de tamaño de grano 60  $\mu\text{m}$ . Se muestra el ciclo 1, 2 y 40 para las tres deformaciones y también se muestra un rango de la curva de tracción. En la tabla 4.26 se muestran los parámetros característicos calculados para el ciclo 2 de cada ensayo.

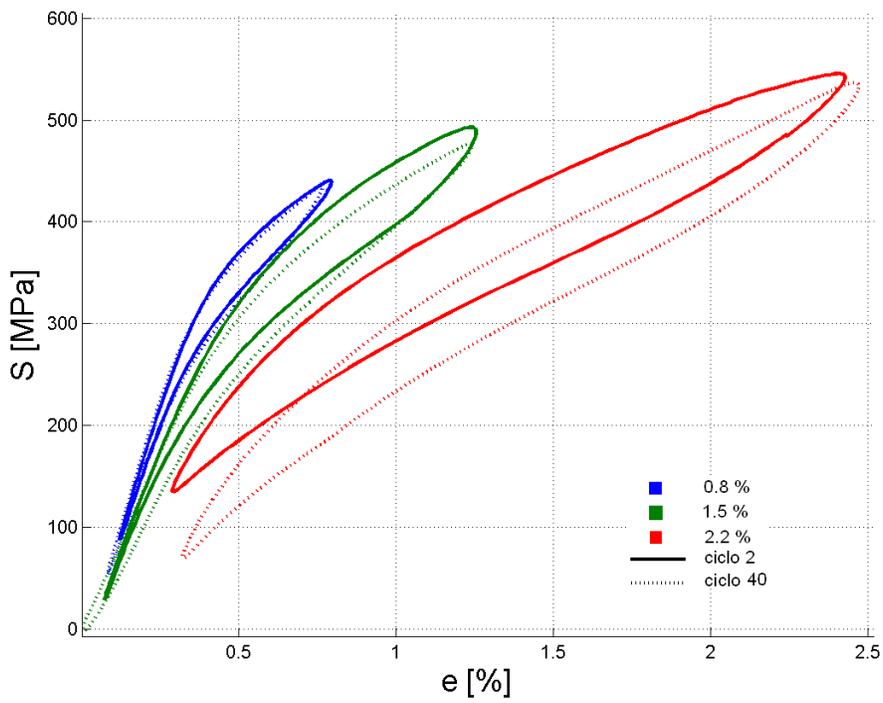
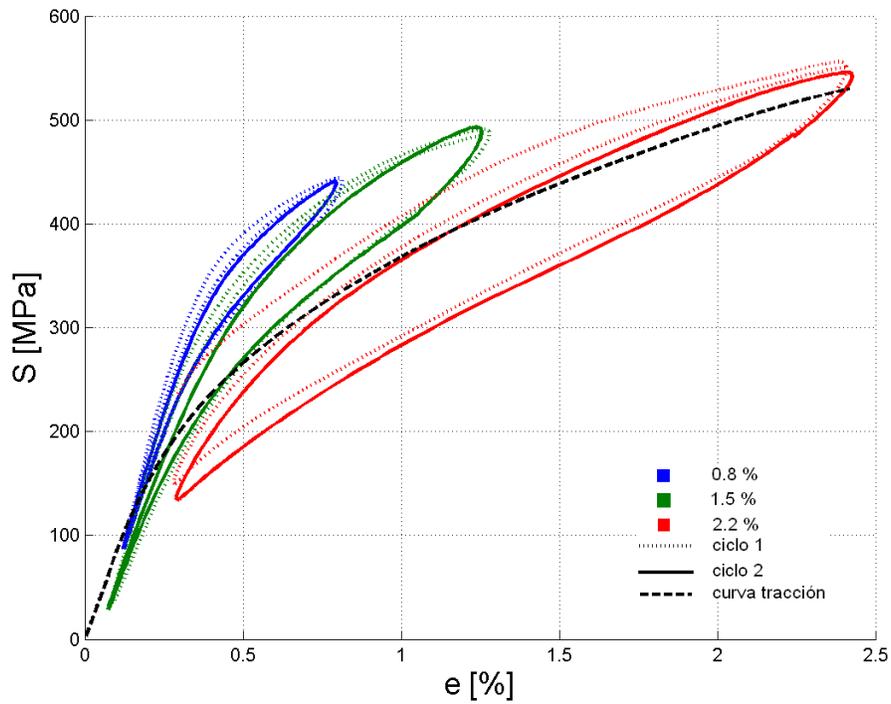


Figura 4.45: Curvas cíclicas a 25 °C, 60  $\mu\text{m}$  y a las deformaciones nominales indicadas. Se muestran los ciclos 1, 2 y 40 y la curva de tracción.

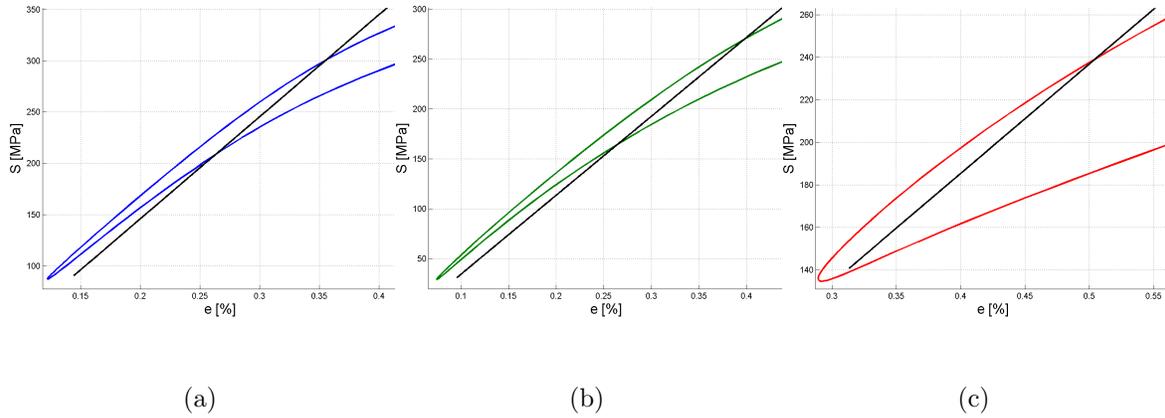


Figura 4.46: Determinación esfuerzo de transformación: a) 0.8; b) 1.5; c) 2.2% de deformación nominal.

Tabla 4.26: Parámetros ensayo cíclico a 25 °C, 60  $\mu\text{m}$ .

Def. nominal [%]	$S_t$ [MPa]	Pendientes [GPa]			Máximos		Áreas			$\xi_{Chopra}$ [%]
		E	P	R	$S_{LS}$ [MPa]	$e_{LS}$ [%]	$E_d$	$E_t$	$E_s$	
0,8	300	99	25	53	441	0,8	17	217	178	0,8
1,5	270	79	19	40	493	1,3	49	403	308	1,3
2,2	240	52	15	19	546	2,4	146	864	727	1,6

Las rectas utilizadas para determinar el esfuerzo de transformación en las curvas de histéresis, se muestran en la figura 4.46.

En la figura 4.47 se muestran las curvas obtenidas en los ensayos realizados a 25 °C, utilizando una probeta de tamaño de grano 100  $\mu\text{m}$ . Se muestra el ciclo 1, 2 y 40 para las tres deformaciones y también se muestra un rango de la curva de tracción. En la tabla 4.27 se muestran los parámetros característicos calculados para el ciclo 2 de cada ensayo.

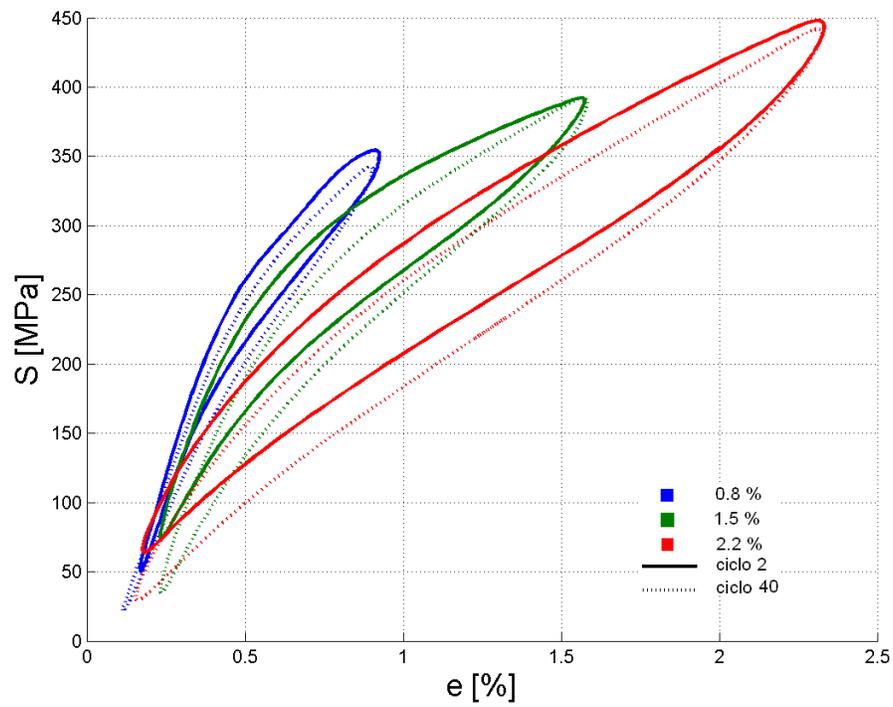
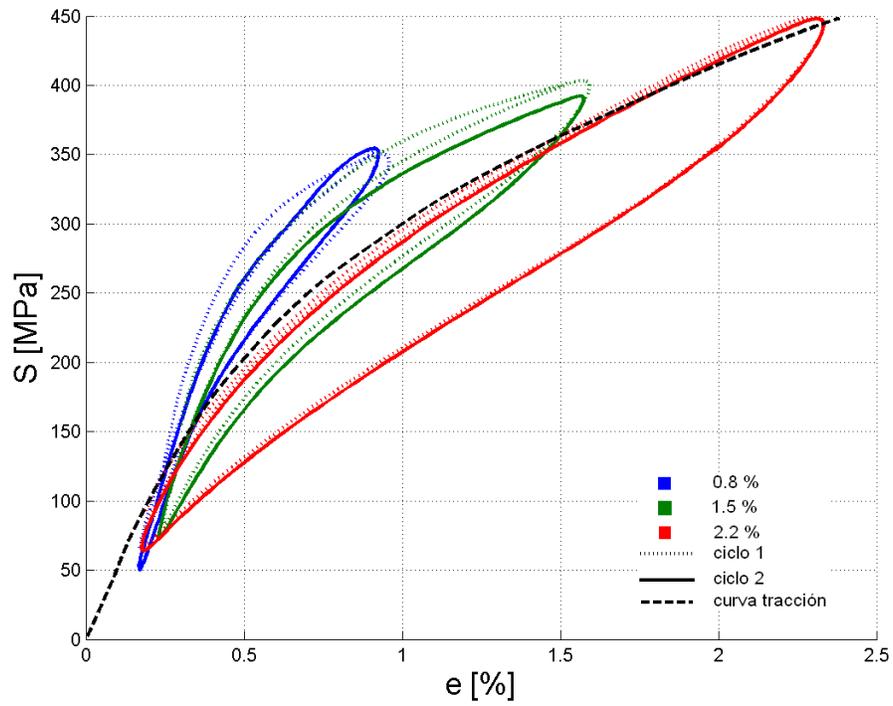


Figura 4.47: Curvas cíclicas a 25 °C, 100  $\mu\text{m}$  y a las deformaciones nominales indicadas. Se muestran los ciclos 1, 2 y 40 y la curva de tracción.

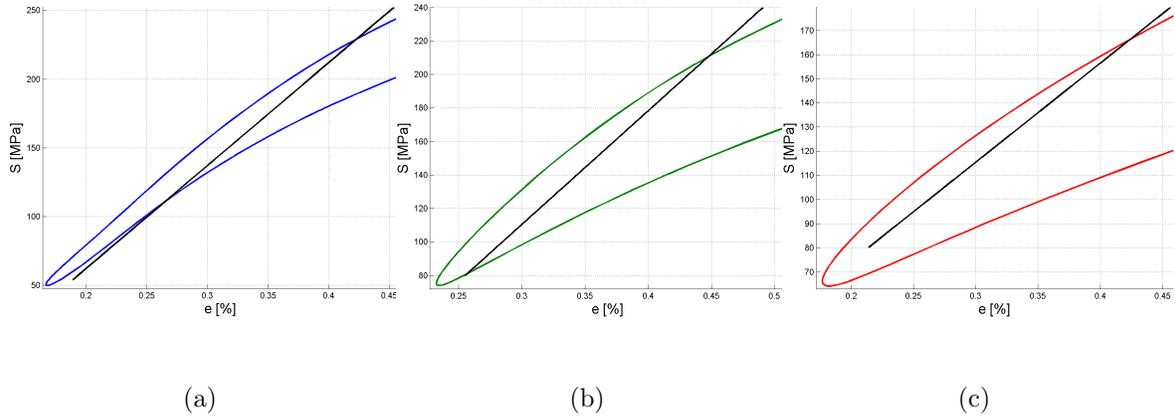


Figura 4.48: Determinación esfuerzo de transformación: a) 0.8; b) 1.5; c) 2.2% de deformación nominal.

Tabla 4.27: Parámetros ensayo cíclico a 25 °C, 100  $\mu\text{m}$ .

Def. nominal [%]	$S_t$ [MPa]	Pendientes [GPa]			Máximos		Áreas			$\xi_{Chopra}$ [%]
		E	P	R	$S_{LS}$ [MPa]	$e_{LS}$ [%]	$E_d$	$E_t$	$E_s$	
0,8	229	75	26	41	354	0,9	22	191	153	1,1
1,5	210	68	11	24	392	1,6	71	401	313	1,8
2,2	166	41	12	18	448	2,3	137	664	552	2,0

Las rectas utilizadas para determinar el esfuerzo de transformación en las curvas de histéresis, se muestran en la figura 4.48.

En la figura 4.49 se muestran las curvas obtenidas en los ensayos realizados a 25 °C, utilizando una probeta de tamaño de grano 200  $\mu\text{m}$ . Se muestra el ciclo 1, 2 y 40 para las tres deformaciones y también se muestra un rango de la curva de tracción. En la tabla 4.28 se muestran los parámetros característicos calculados para el ciclo 2 de cada ensayo.

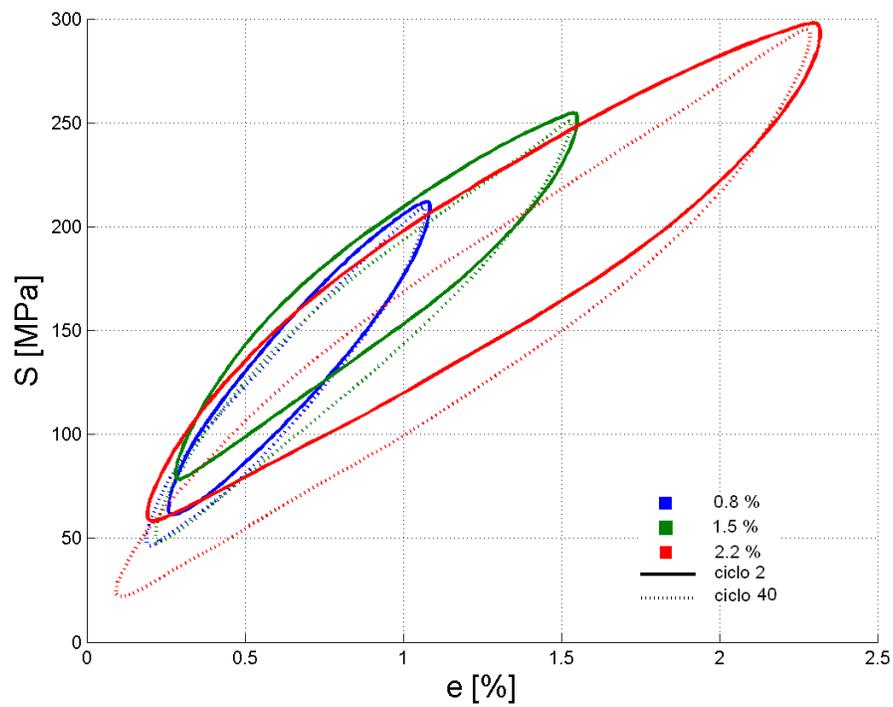
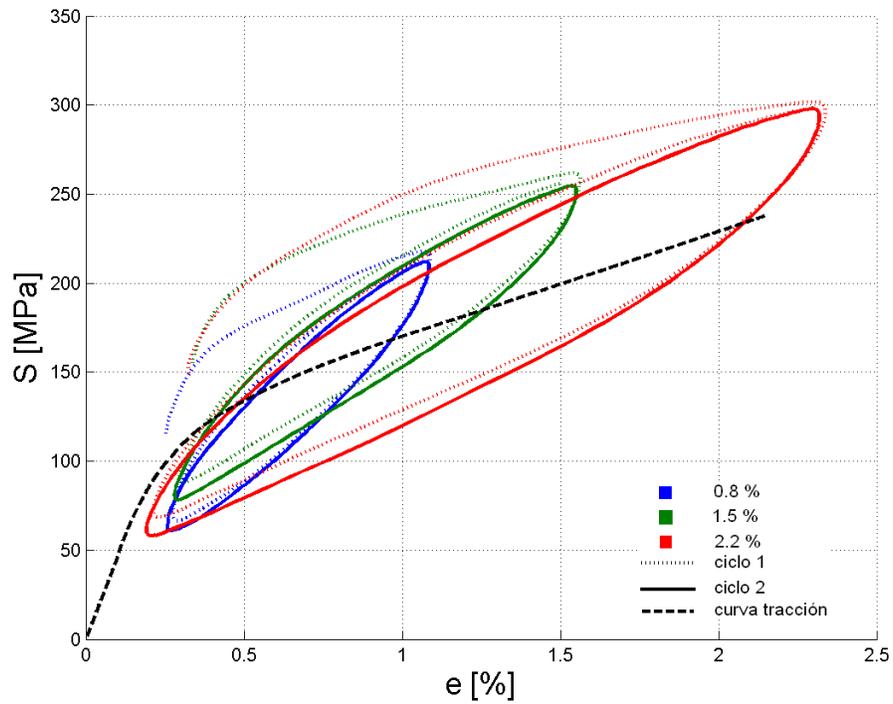


Figura 4.49: Curvas cíclicas a 25 °C, 200  $\mu\text{m}$  y a las deformaciones nominales indicadas. Se muestran los ciclos 1, 2 y 40 y la curva de tracción.

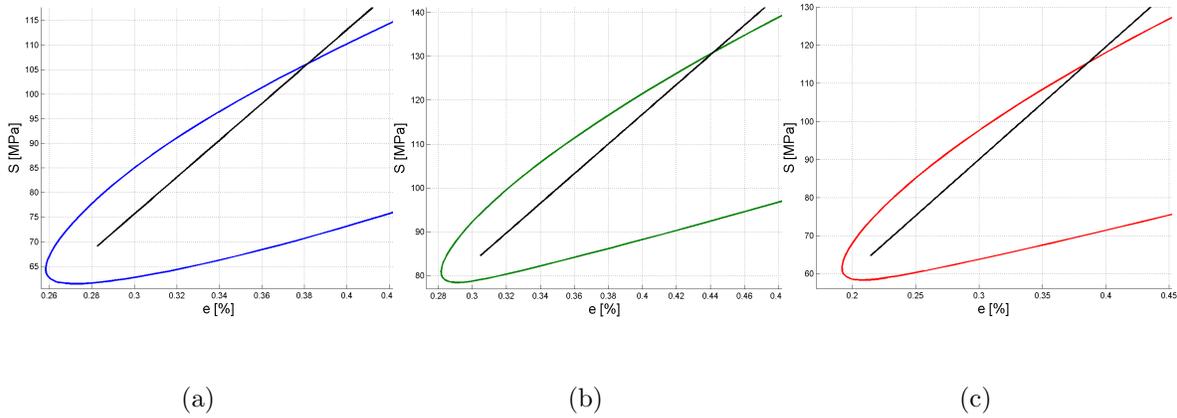


Figura 4.50: Determinación esfuerzo de transformación: a) 0.8; b) 1.5; c) 2.2% de deformación nominal.

Tabla 4.28: Parámetros ensayo cíclico a 25 °C, 200  $\mu\text{m}$ .

Def. nominal [%]	$S_t$ [MPa]	Pendientes [GPa]			Máximos		Áreas			$\xi_{Chopra}$ [%]
		E	P	R	$S_{LS}$ [MPa]	$e_{LS}$ [%]	$E_d$	$E_t$	$E_s$	
0,8	106	37	16	19	212	1,1	31	128	113	2,2
1,5	131	34	10	14	255	1,6	56	245	211	2,1
2,2	115	30	8	11	298	2,3	134	452	379	2,8

Las rectas utilizadas para determinar el esfuerzo de transformación en las curvas de histéresis, se muestran en la figura 4.50.

En la figura 4.51 se muestran las curvas obtenidas en los ensayos realizados a 50 °C, utilizando una probeta de tamaño de grano 60  $\mu\text{m}$ . Se muestra el ciclo 1, 2 y 40 para las tres deformaciones y también se muestra un rango de la curva de tracción. En la tabla 4.29 se muestran los parámetros característicos calculados para el ciclo 2 de cada ensayo.

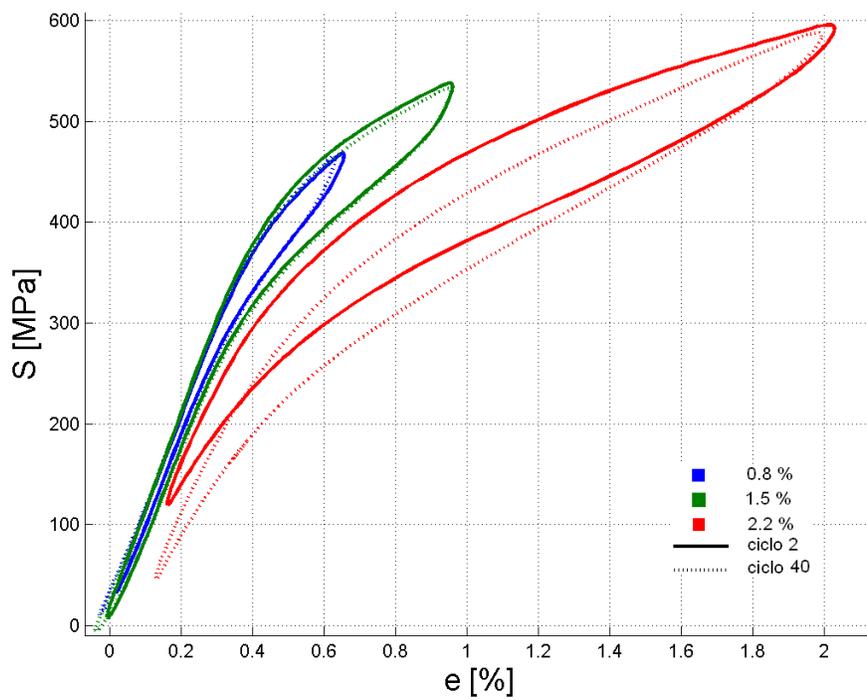
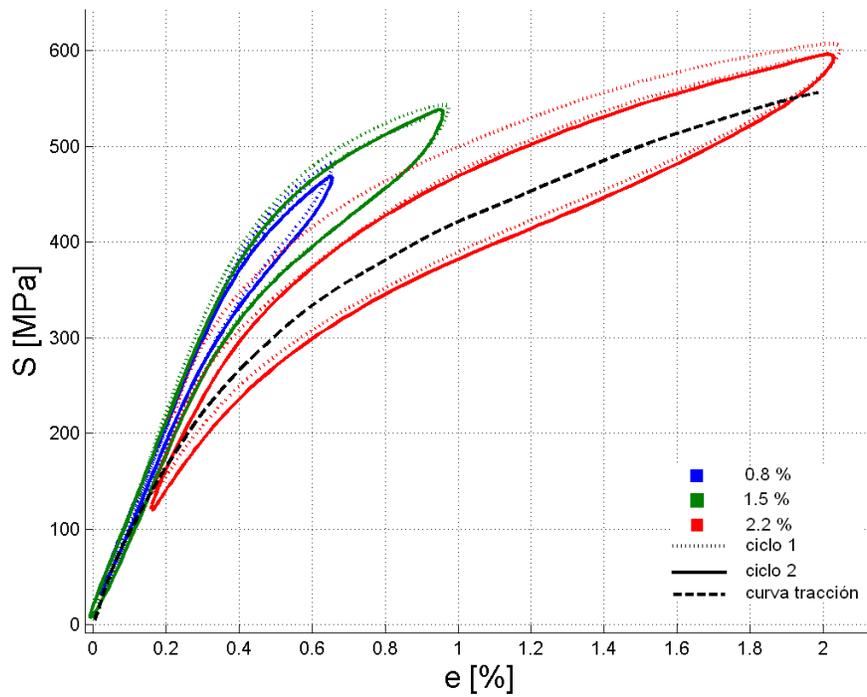


Figura 4.51: Curvas cíclicas a 50 °C, 60  $\mu\text{m}$  y a las deformaciones nominales indicadas. Se muestran los ciclos 1, 2 y 40 y la curva de tracción.

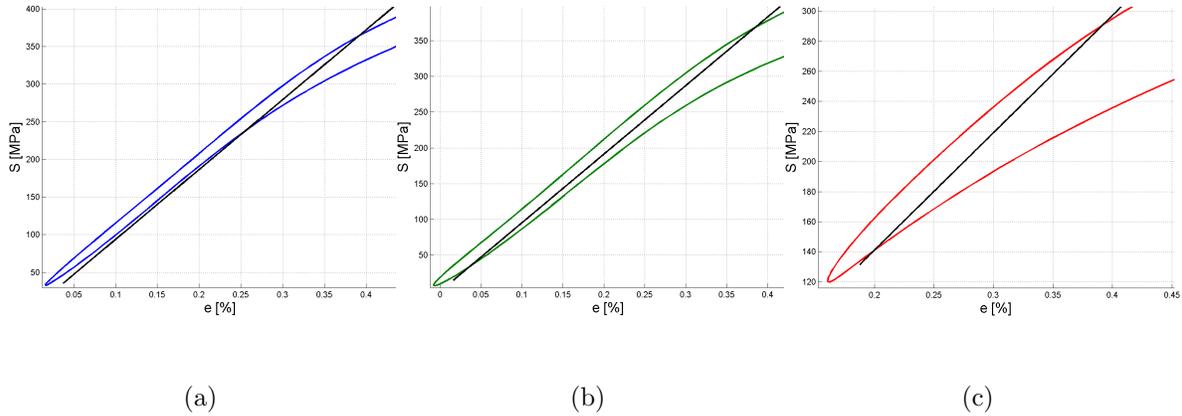


Figura 4.52: Determinación esfuerzo de transformación: a) 0.8; b) 1.5; c) 2.2% de deformación nominal.

Tabla 4.29: Parámetros ensayo cíclico a 50 °C, 60  $\mu\text{m}$ .

Def. nominal [%]	$S_t$ [MPa]	Pendientes [GPa]			Máximos		Áreas			$\xi_{Chopra}$ [%]
		E	P	R	$S_{LS}$ [MPa]	$e_{LS}$ [%]	$E_d$	$E_t$	$E_s$	
0,8	364	93	34	69	469	0,7	14	190	160	0,7
1,5	369	96	20	55	538	1,0	45	350	263	1,4
2,2	291	78	10	26	596	2,0	116	845	668	1,4

Las rectas utilizadas para determinar el esfuerzo de transformación en las curvas de histéresis, se muestran en la figura 4.52.

En la figura 4.53 se muestran las curvas obtenidas en los ensayos realizados a 50 °C, utilizando una probeta de tamaño de grano 100  $\mu\text{m}$ . Se muestra el ciclo 1, 2 y 40 para las tres deformaciones y también se muestra un rango de la curva de tracción. En la tabla 4.30 se muestran los parámetros característicos calculados para el ciclo 2 de cada ensayo.

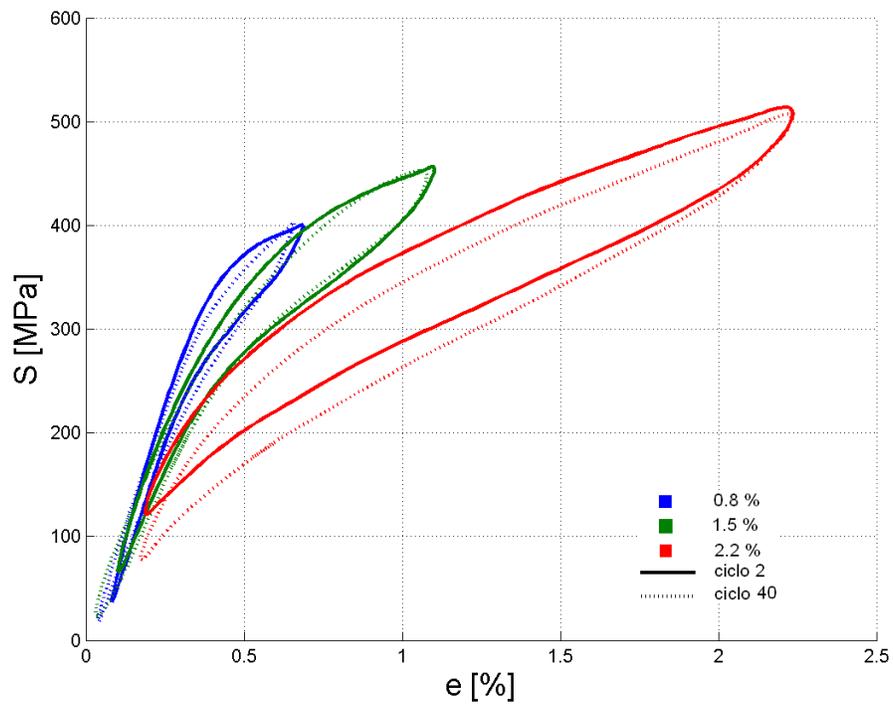
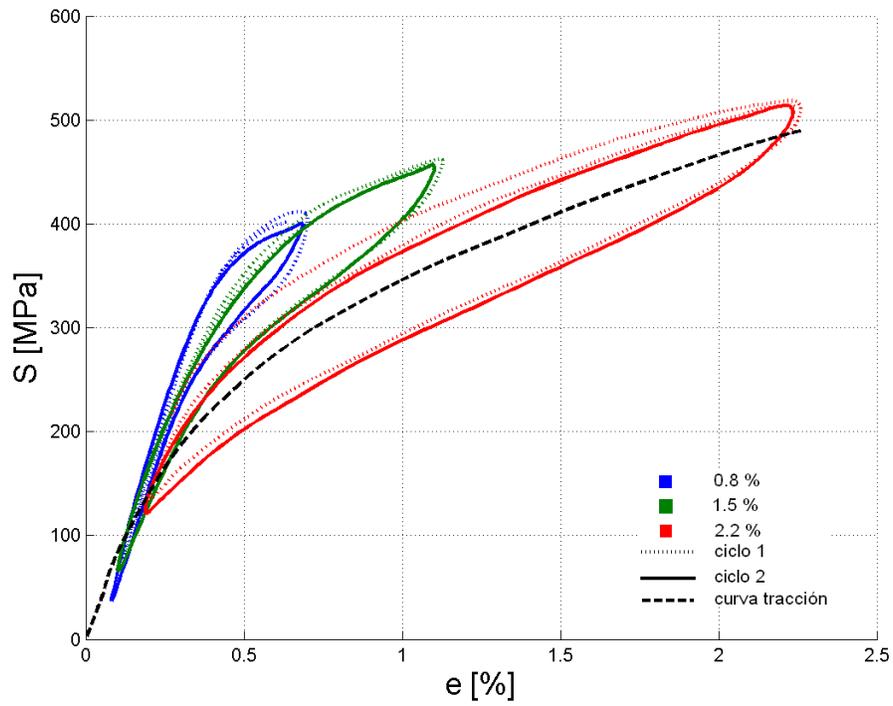


Figura 4.53: Curvas cíclicas a 50 °C, 100  $\mu\text{m}$  y a las deformaciones nominales indicadas. Se muestran los ciclos 1, 2 y 40 y la curva de tracción.

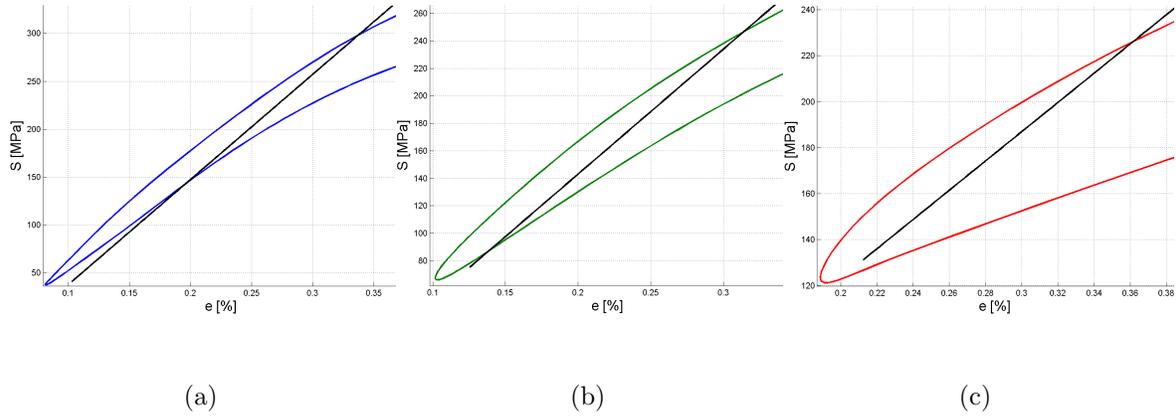


Figura 4.54: Determinación esfuerzo de transformación: a) 0.8; b) 1.5; c) 2.2% de deformación nominal.

Tabla 4.30: Parámetros ensayo cíclico a 50 °C, 100  $\mu\text{m}$ .

Def. nominal [%]	$S_t$ [MPa]	Pendientes [GPa]			Máximos		Áreas			$\xi_{Chopra}$ [%]
		E	P	R	$S_{LS}$ [MPa]	$e_{LS}$ [%]	$E_d$	$E_t$	$E_s$	
0,8	298	110	13	60	400	0,7	24	174	132	1,4
1,5	247	91	12	39	456	1,1	47	338	261	1,4
2,2	226	64	11	19	514	2,2	140	788	650	1,7

Las rectas utilizadas para determinar el esfuerzo de transformación en las curvas de histéresis, se muestran en la figura 4.54.

En la figura 4.55 se muestran las curvas obtenidas en los ensayos realizados a 50 °C, utilizando una probeta de tamaño de grano 200  $\mu\text{m}$ . Se muestra el ciclo 1, 2 y 40 para las tres deformaciones y también se muestra un rango de la curva de tracción. En la tabla 4.31 se muestran los parámetros característicos calculados para el ciclo 2 de cada ensayo.

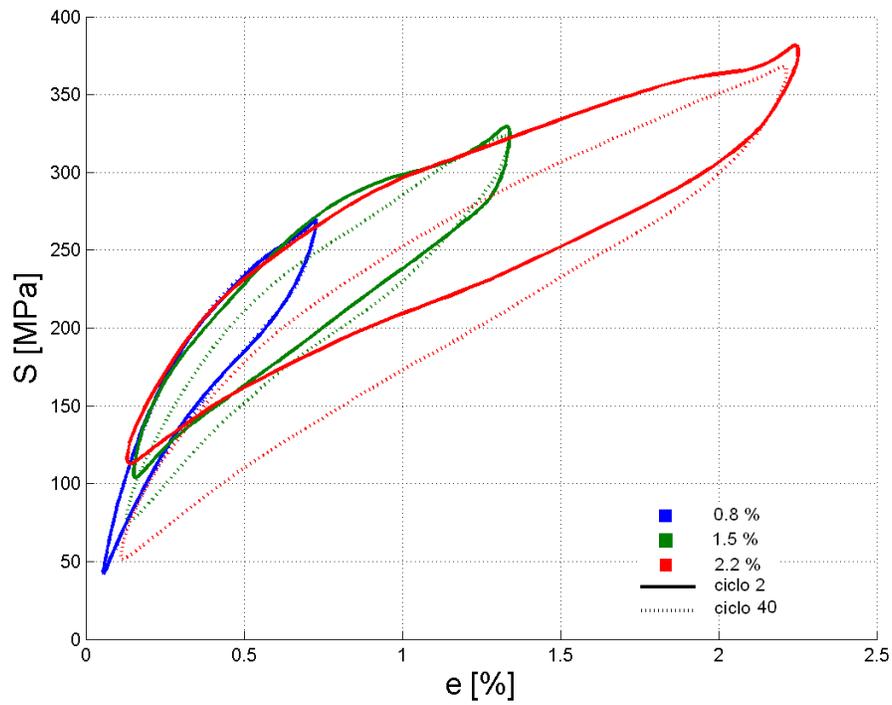
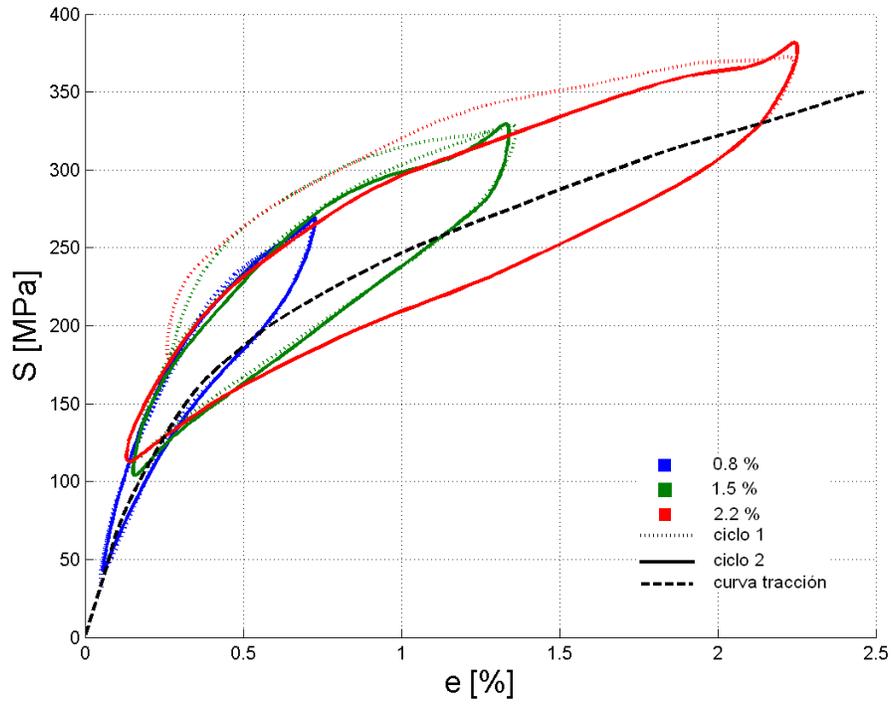


Figura 4.55: Curvas cíclicas a 50 °C, 200 μm y a las deformaciones nominales indicadas. Se muestran los ciclos 1, 2 y 40 y la curva de tracción.

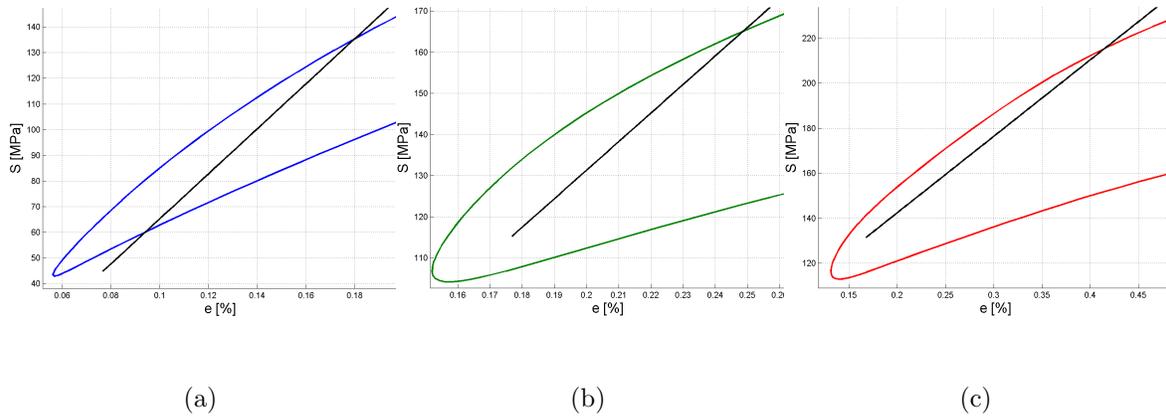


Figura 4.56: Determinación esfuerzo de transformación: a) 0.8; b) 1.5; c) 2.2% de deformación nominal.

Tabla 4.31: Parámetros ensayo cíclico a 50 °C, 200  $\mu\text{m}$ .

Def. nominal [%]	$S_t$ [MPa]	Pendientes [GPa]			Máximos		Áreas			$\xi_{Chopra}$ [%]
		E	P	R	$S_{LS}$ [MPa]	$e_{LS}$ [%]	$E_d$	$E_t$	$E_s$	
0,8	135	88	15	34	269	0,7	25	131	105	1,9
1,5	165	69	6	19	329	1,3	64	305	257	2,0
2,2	216	34	7	13	382	2,3	142	628	524	2,2

Las rectas utilizadas para determinar el esfuerzo de transformación en las curvas de histéresis, se muestran en la figura 4.56.

En las páginas anteriores se han presentado los resultados por separado para cada par de temperatura y tamaño de grano. Para poder observar la influencia de cada parámetro por separado es necesario observar las curvas como conjunto. En las figuras que se presentan en las páginas siguientes se agrupan las curvas de tal forma de poder observar la influencia de la deformación nominal impuesta, el tamaño de grano y la temperatura.

En la figura 4.57 se muestra la influencia de la deformación. En cada recuadro se muestra el ciclo 2 y el 40 y se varía la amplitud de deformación, manteniéndose fija la temperatura y el tamaño de grano que se indican para cada recuadro. Se puede observar que las curvas se ordenan en forma ascendente estricta al disminuir la amplitud de deformación, comportamiento que es claro en casi todas las curvas, tanto para el ciclo 2 como para el 40, salvo en las curvas del ciclo 2 de los ensayos a 50 °C y 60  $\mu\text{m}$  y a 25 °C y 200  $\mu\text{m}$ , donde las curvas a

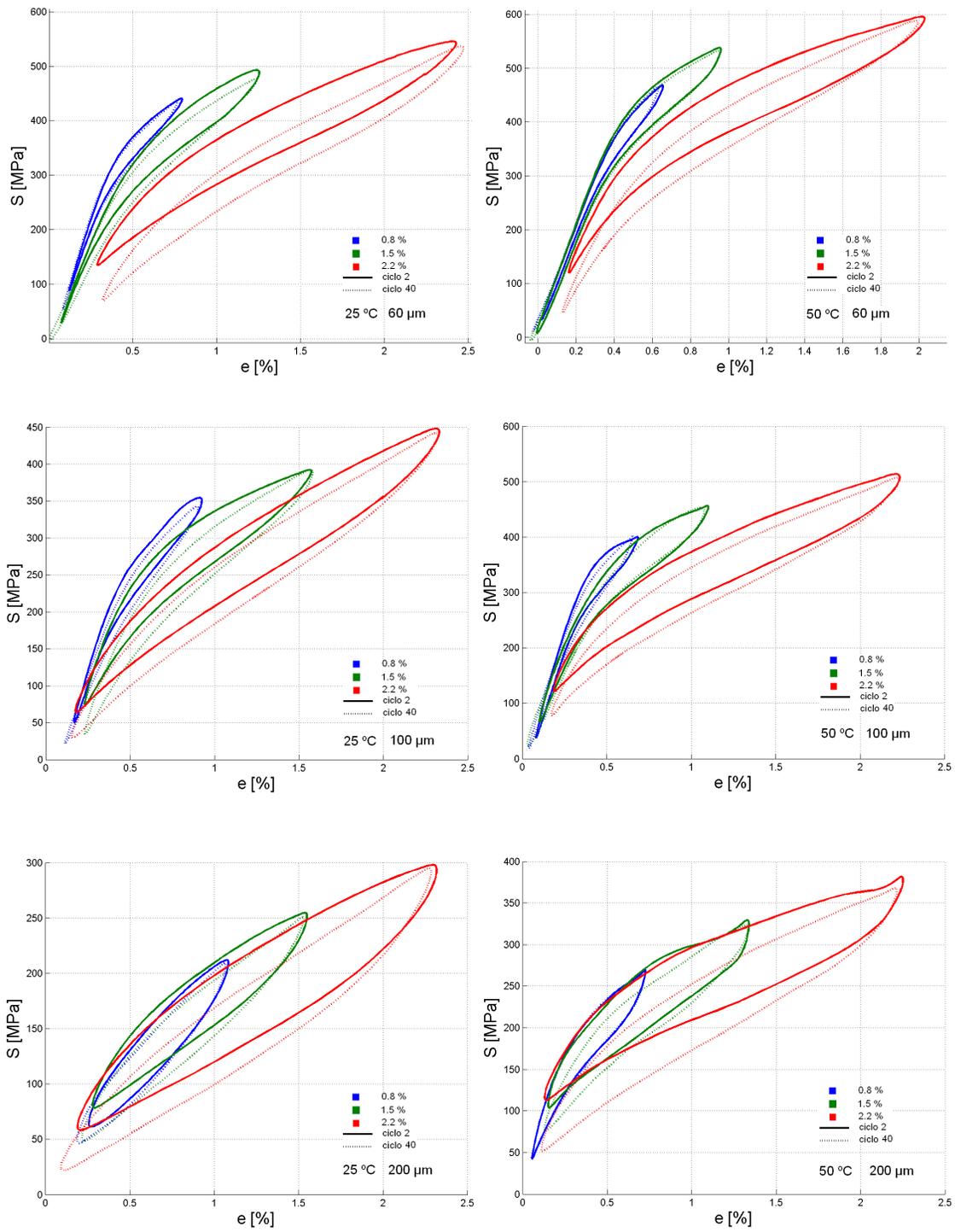


Figura 4.57: Curvas cíclicas para distintas deformaciones nominales, en términos de los parámetros temperatura y tamaño de grano indicados. En cada recuadro se presenta el ciclo 2 y 40.

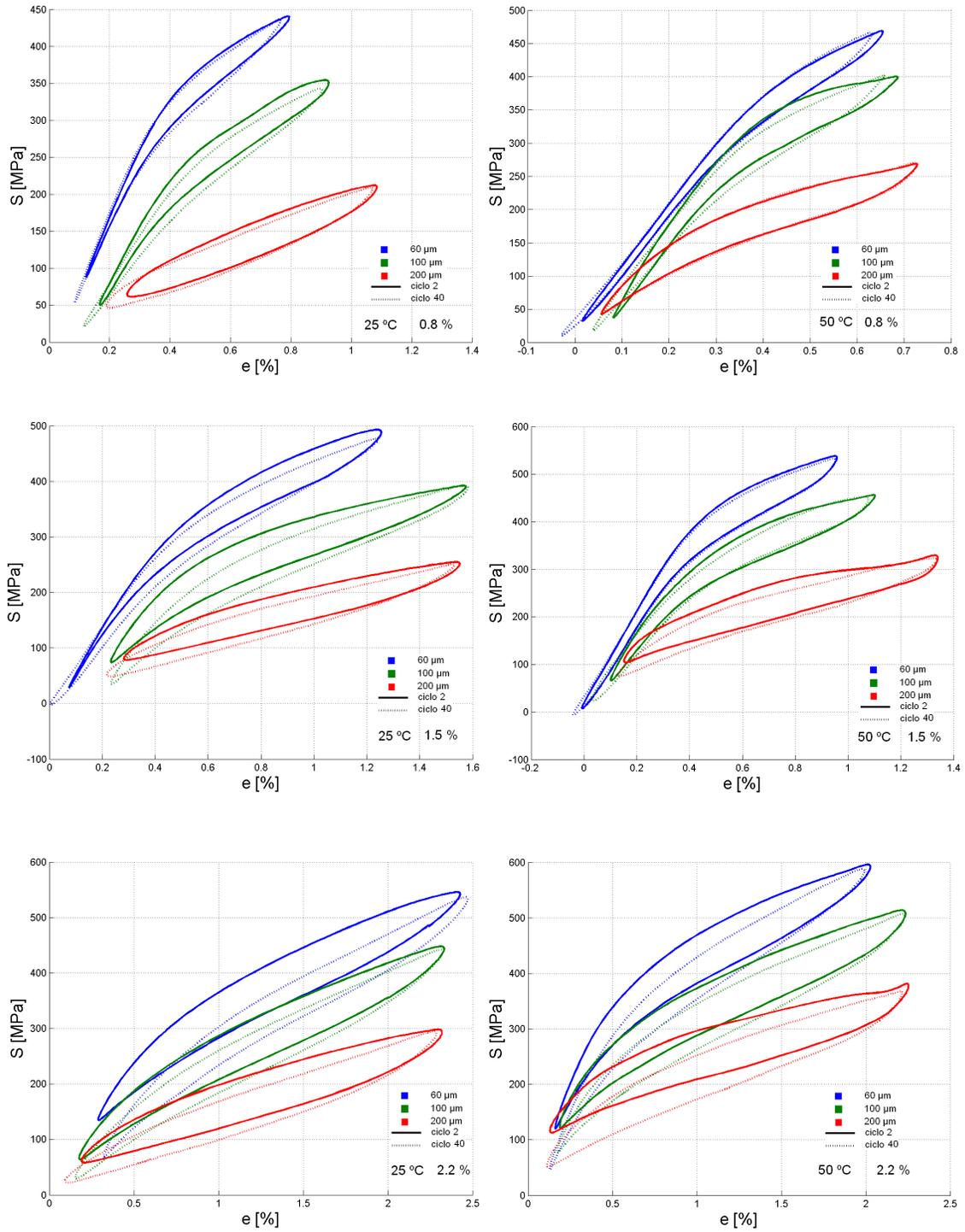


Figura 4.58: Curvas cíclicas para distintos tamaños de grano, en términos de los parámetros deformación y temperatura indicados. En cada recuadro se presenta el ciclo 2 y 40.

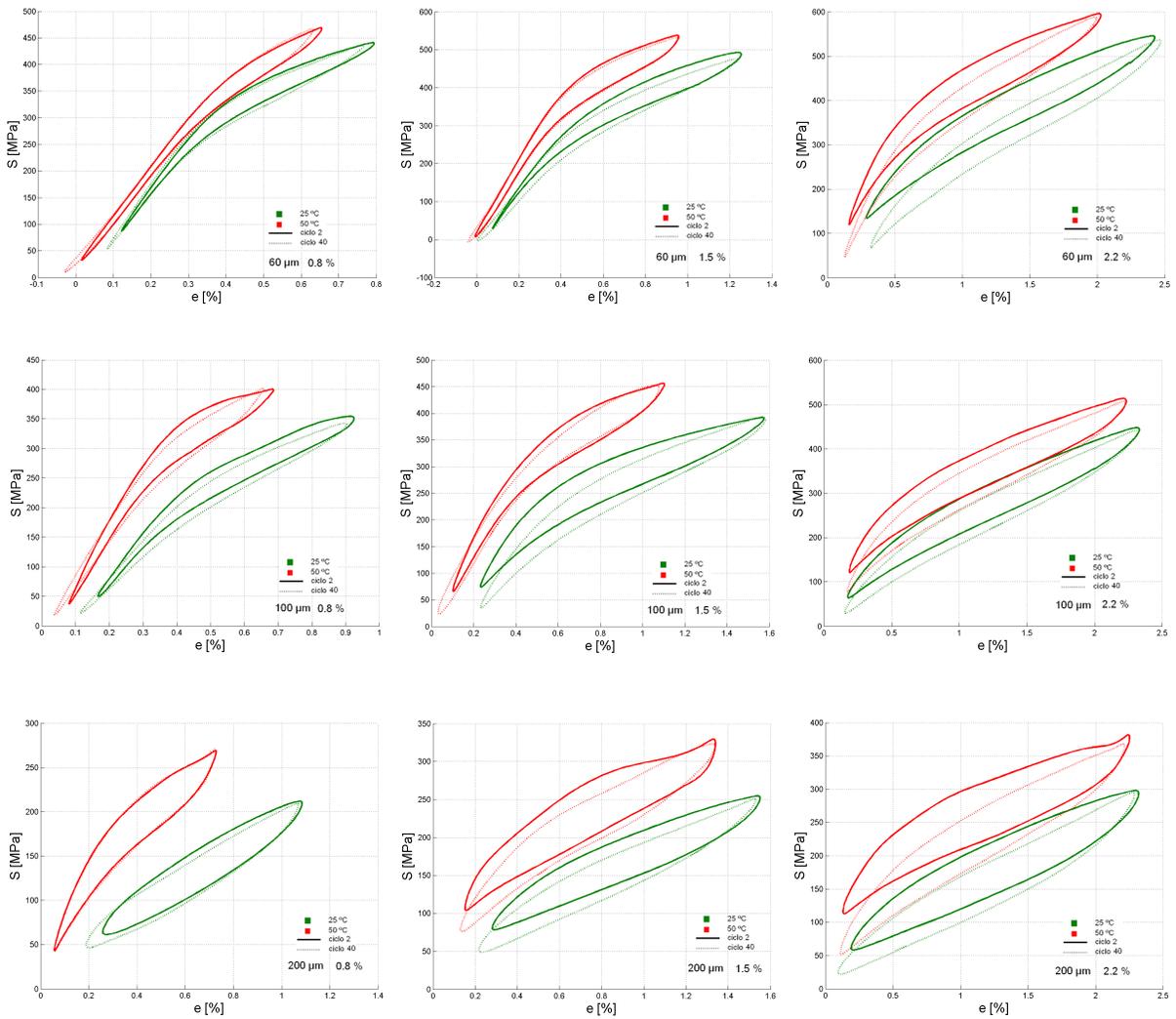


Figura 4.59: Curvas cíclicas para distintas temperaturas, en términos de los parámetros deformación y tamaño de grano indicados. En cada recuadro se presenta el ciclo 2 y 40.

0.8% de amplitud se encuentran debajo de la envolvente superior de las curvas a 1.5%. Es posible que este comportamiento fuera de tendencia se deba a la corrección que se realizó a todas las curvas cíclicas (ver sección 4.2.4), el cual implicaba trasladarlas horizontalmente hacia la derecha, utilizando el módulo elástico del tramo lineal que se alcanzaba a observar.

En la figura 4.58 se muestra la influencia del tamaño de grano. En cada recuadro se muestra el ciclo 2 y el 40 y se varía el tamaño de grano, manteniéndose fija la temperatura y la amplitud de deformación que se indican para cada recuadro. En este caso la tendencia es

clara tanto para el ciclo 2 como para el 40: las curvas se ordenan en forma ascendente estricta al disminuir el tamaño de grano. Al igual que el comportamiento observado en las curvas de tracción, este corrimiento hacia arriba de las curvas es derivado del aumento del esfuerzo de transformación con la disminución del tamaño de grano (ver figura 4.61 y tabla 4.32), aumento que se debe a la mayor cantidad de bordes de grano, como se explicó anteriormente.

Otro fenómeno que se detecta al mirar la figura 4.58 es que, para una deformación nominal y temperatura fija, las curvas alcanzan valores máximos de deformación menores al disminuir el tamaño de grano. Este hecho tiene una explicación análoga a aquella dada en la sección 4.4.1 para el mismo fenómeno (pero con la temperatura) y tiene que ver con el modelo del sistema probeta-resorte como un sistema de resortes en serie (ver figura 4.42): al disminuir el tamaño de grano se sabe que el esfuerzo de transformación aumenta y hace que toda la curva se traslade hacia arriba, es decir la probeta se hace más dura ( $K_{probeta}$  aumenta) y por lo tanto la deformación de ésta disminuye en relación a tamaños de granos mayores, con deformación nominal fija.

Finalmente, en la figura 4.59 se muestra la influencia de la temperatura. En cada recuadro se muestra el ciclo 2 y el 40 y se varía la temperatura, manteniéndose fijo el tamaño de grano y la amplitud de deformación que se indican para cada recuadro. Se observan los dos fenómenos explicados en la sección 4.4.1: las curvas se ordenan en forma ascendente al aumentar la temperatura, lo que tienen que ver con el aumento de  $S_t$  (figura 4.62 y tabla 4.32) y se alcanzan deformaciones menores al aumentar la temperatura.

Aparte de observar el comportamiento de las curvas de histéresis del material con cada variable, también es importante observar las tendencias de los parámetros importantes de las curvas, como el esfuerzo de transformación y el factor de amortiguamiento. En las tablas 4.32 y 4.33 se muestra un resumen de los valores del esfuerzo de transformación y el factor de amortiguamiento de Chopra, respectivamente.

Tabla 4.32: Resumen de los valores de  $S_t$  [MPa].

Temperatura [°C]	Def. Nominal [%]	Tamaño de grano [um]		
		60	100	200
25	0,8	300	229	106
	1,5	270	210	131
	2,2	240	166	115
50	0,8	364	298	135
	1,5	369	247	165
	2,2	291	226	216

Tabla 4.33: Resumen de los valores de  $\xi_{Chopra}$  [%].

Temperatura [°C]	Def. Nominal [%]	Tamaño de grano [um]		
		60	100	200
25	0,8	0,8	1,1	2,2
	1,5	1,3	1,8	2,1
	2,2	1,6	2,0	2,8
50	0,8	0,7	1,4	1,9
	1,5	1,4	1,4	2,0
	2,2	1,4	1,7	2,2

En forma gráfica, en la figura 4.60 se ve que  $S_t$  no sigue un patrón estricto con la deformación, aunque mayoritariamente la tendencia es a decaer con el aumento de ésta. En la figura 4.61 se puede observar que  $S_t$  decrece al aumentar el tamaño de grano y aumenta al aumentar la temperatura, como se ve en la figura 4.62.

En el caso del factor de amortiguamiento  $\xi_{Chopra}$ , su comportamiento con la deformación (figura 4.63) no tiene un patrón definido aunque la tendencia es a aumentar con el aumento de ésta, al igual que con el tamaño de grano, como se vé en la figura 4.64. Con la temperatura el

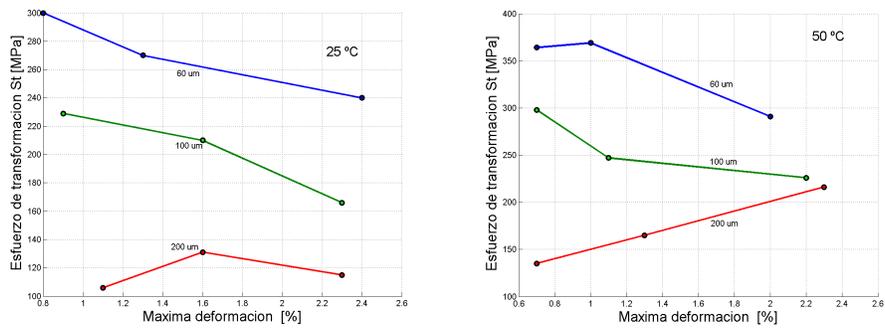


Figura 4.60: Variación de  $S_t$  con la máxima deformación ( $e_{LS}$ ), para las temperaturas y tamaño de grano indicados.

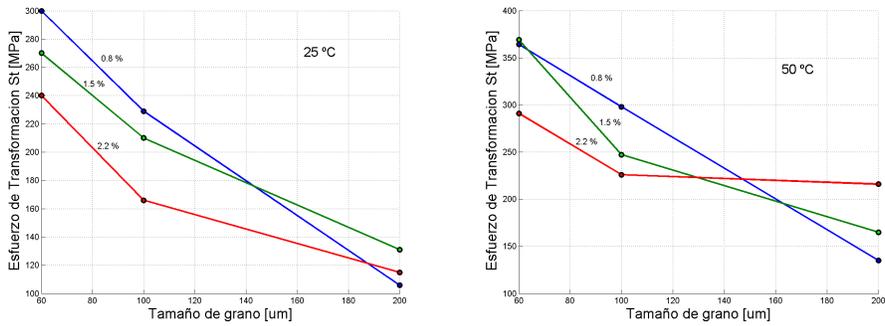


Figura 4.61: Variación de  $S_t$  con el tamaño de grano, para las temperaturas y porcentajes de deformación indicados.

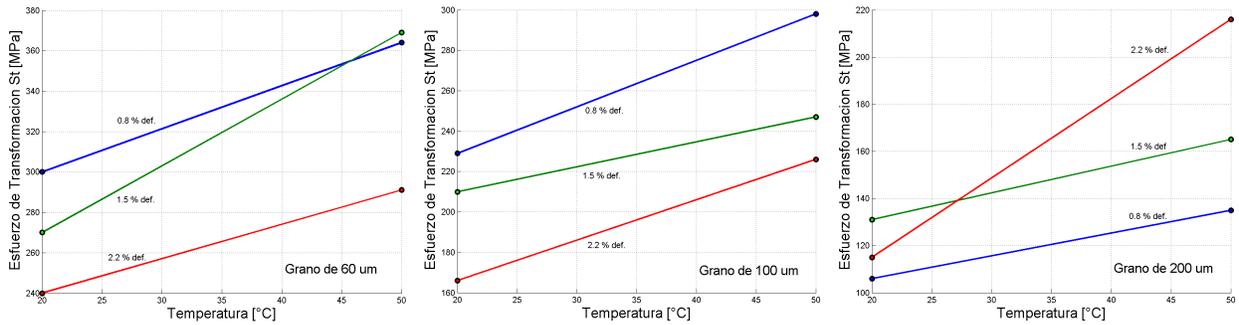


Figura 4.62: Variación de  $S_t$  con la temperatura, para los tamaños de granos y porcentajes de deformación indicados.

comportamiento no es claro aunque mayoritariamente decrece con el aumento de ésta (figura 4.65).

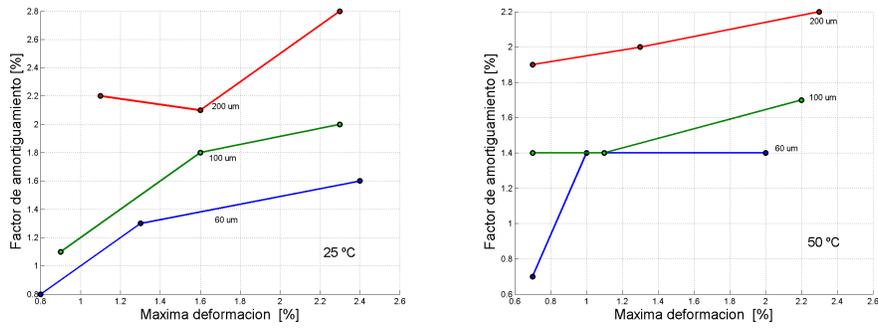


Figura 4.63: Variación de  $\xi_{Chopra}$  con la máxima deformación ( $e_{LS}$ ), para las temperaturas y tamaño de grano indicados.

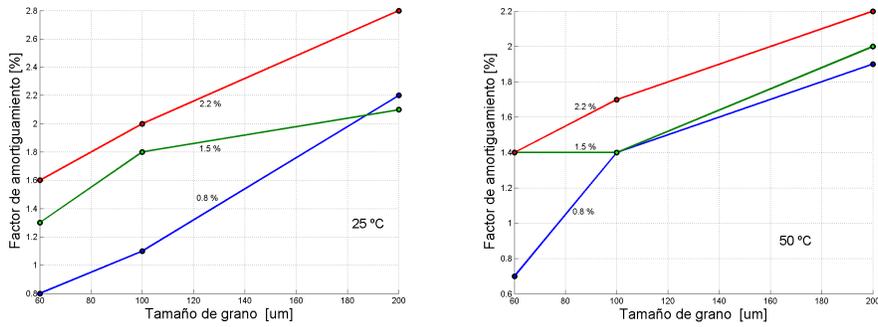


Figura 4.64: Variación de  $\xi_{Chopra}$  con el tamaño de grano, para las temperaturas y porcentajes de deformación indicados.

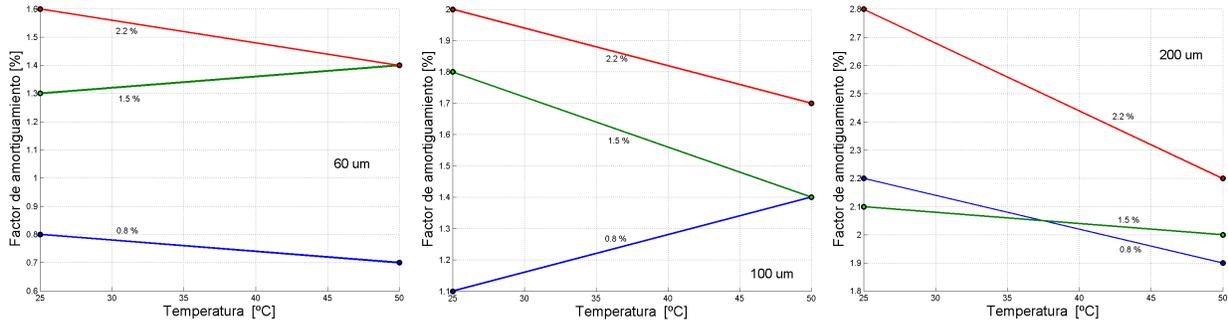


Figura 4.65: Variación de  $\xi_{Chopra}$  con la temperatura, para los tamaños de granos y porcentajes de deformación indicados.

Uno de los objetivos planteados para la realización de estos ensayos fue realizar una comparación entre las curvas obtenidas por medio de la metodología utilizada por C. Mir y la nueva utilizada en este caso. En las figuras 4.66 y 4.67 se muestran las curvas obtenidas

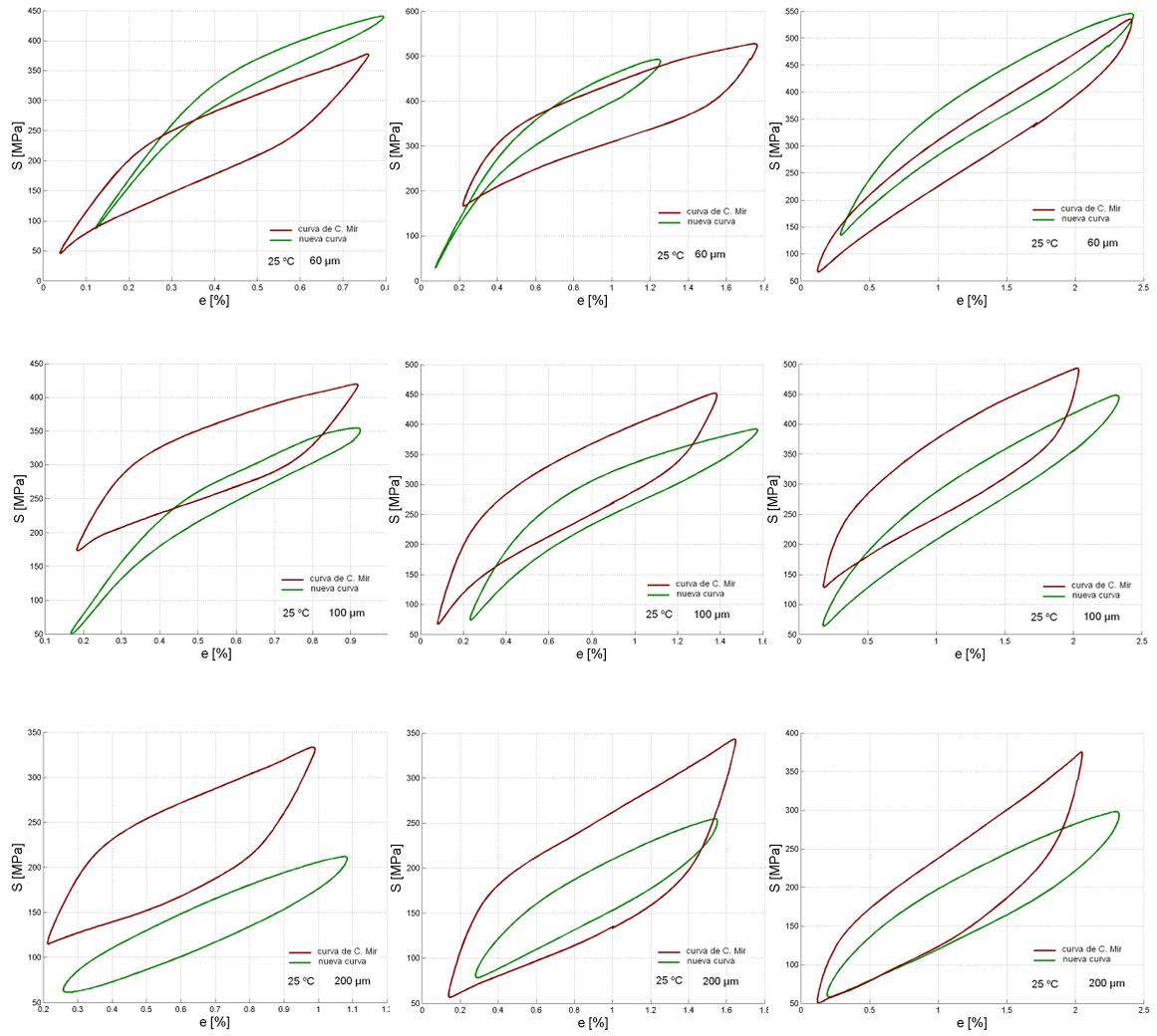


Figura 4.66: Comparación con curvas cíclicas de C. Mir (ciclo 2), para distintas deformaciones, en términos de los parámetros temperatura y tamaño de grano.

por ambos métodos (se muestra el ciclo 2). Se considera la primera serie de temperaturas de la metodología de C. Mir.

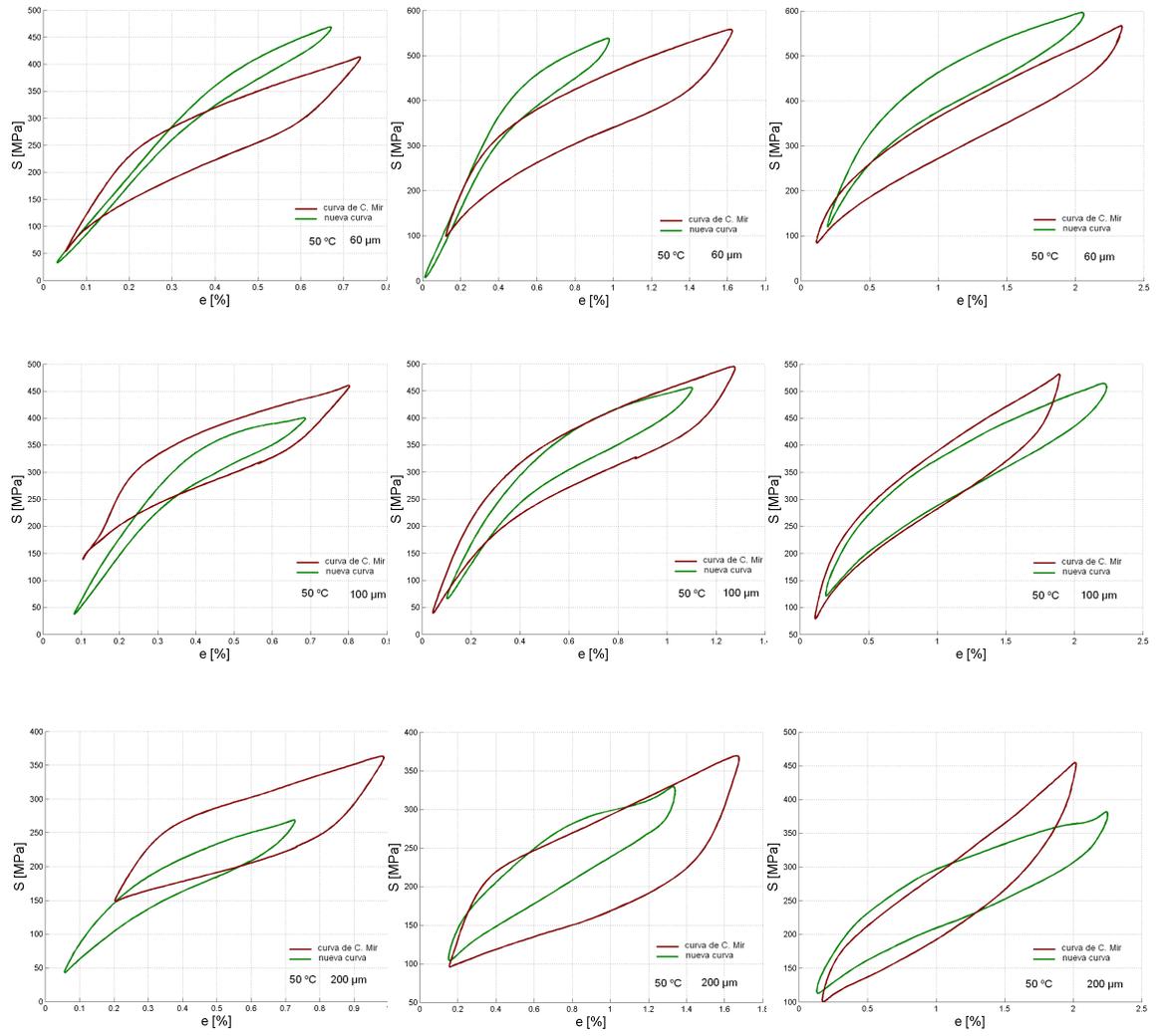


Figura 4.67: Comparación con curvas cíclicas de C. Mir (ciclo 2), para distintas deformaciones, en términos de los parámetros temperatura y tamaño de grano.

#### 4.4.4. Influencia de la frecuencia de ciclado

Estos ensayos se realizaron a 25 °C, se utilizó una probeta de tamaño de grano igual a 115  $\mu\text{m}$  y se impuso una deformación nominal fija de 1.5 %. La probeta se cicló a tres frecuencias: 0.03, 0.1 y 1 Hz, es decir se aumentó aproximadamente 10 veces la frecuencia de un ensayo a otro. Después de ciclar a cada una de las frecuencias se finalizó con ensayo a la fractura. Con la realización de este ensayo se pretendía observar la influencia de la frecuencia de ciclado en el comportamiento de la aleación.

En la figura 4.68 se presentan las curvas obtenidas. Se muestra el ciclo 1, 2 y 40 para las tres frecuencias y también se muestra un rango de la curva de tracción. En la tabla 4.34 se muestran los parámetros característicos calculados para el ciclo 2 de cada ensayo.

Se puede observar que al aumentar la frecuencia las curvas se desplazan hacia la derecha alcanzando valores máximos de esfuerzo y deformación mayores, como se puede ver en la tabla 4.34, pero no se observa una ubicación vertical ordenada de las curvas, salvo que, tanto para el ciclo 1, el 2 y el ciclo 40, la curva correspondiente a 0.03 Hz se encuentra siempre por sobre las otras dos, entre las cuales no existe una diferencia notable. Los valores del esfuerzo de transformación no presentan una tendencia definida al variar la frecuencia, al contrario del factor de amortiguamiento que disminuye al aumentar la frecuencia, como se muestra en la figura 4.70.

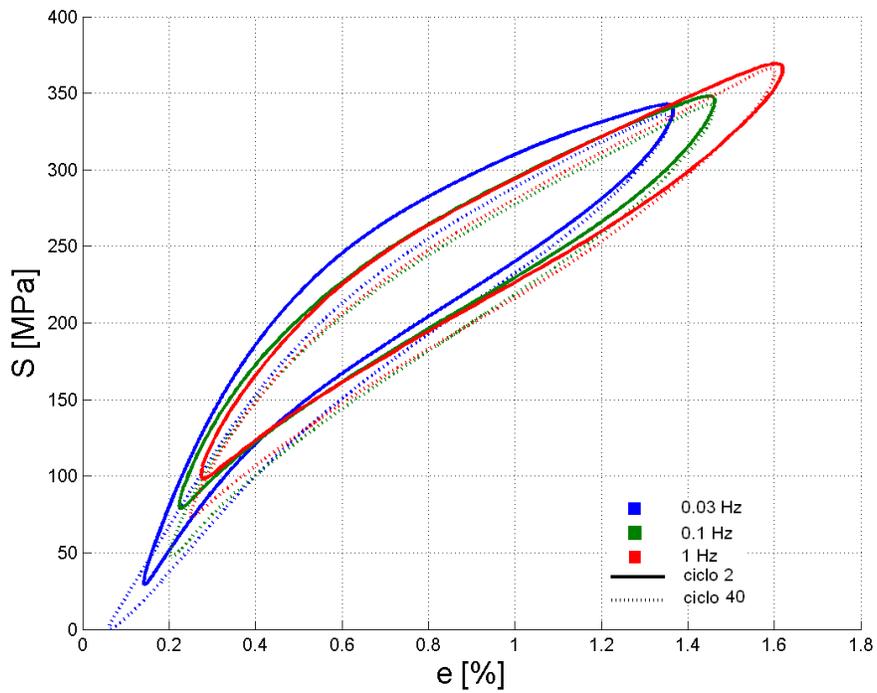
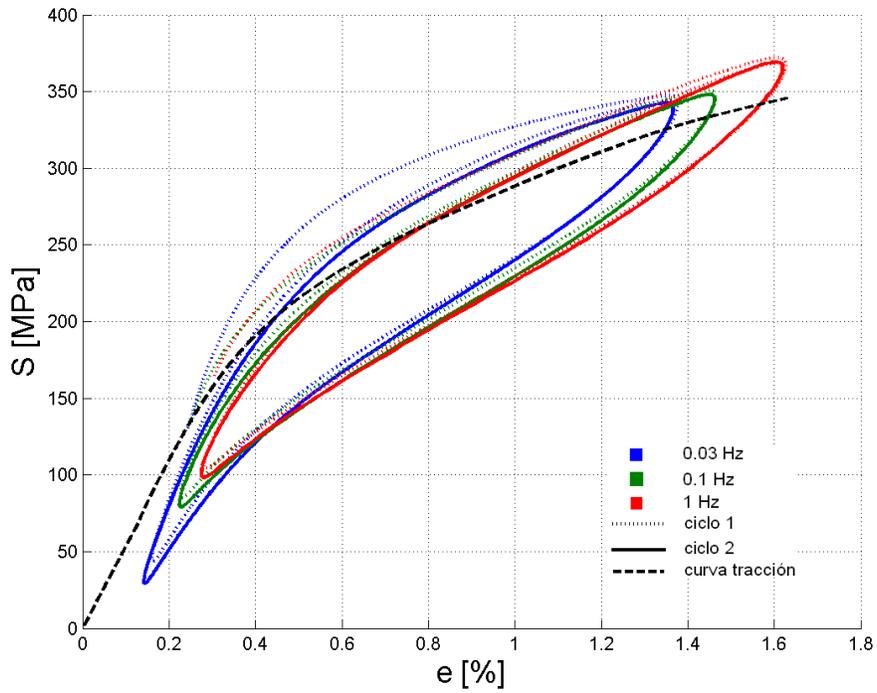


Figura 4.68: Curvas cíclicas a 25 °C, 1,5 % deformación, 115  $\mu\text{m}$  y a las frecuencias indicadas. Se muestran los ciclos 1, 2 y 40 y la curva de tracción.

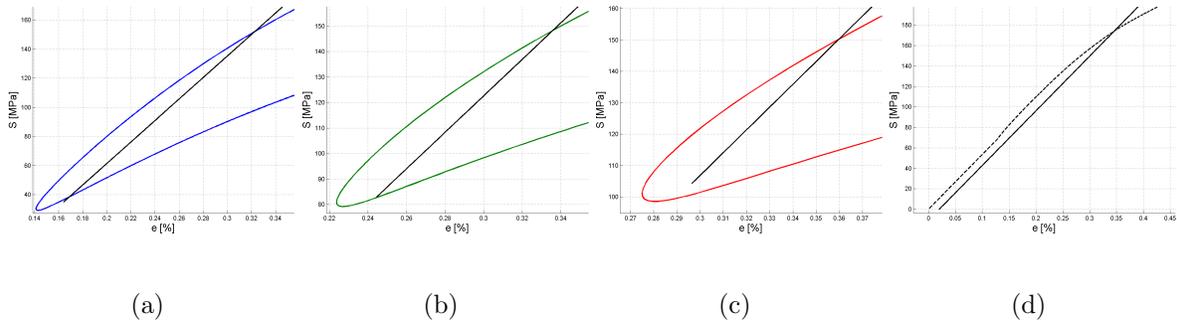


Figura 4.69: Determinación del esfuerzo de transformación ciclo 2 y curva de tracción: a) 0.03 Hz; b) 0.1 Hz; c) 1 Hz de frecuencia nominal; d) curva de tracción.

Tabla 4.34: Parámetros ensayos cíclicos a 1,5 % deformación nominal, 25 °C, 115  $\mu\text{m}$ .

Frec. Nominal [Hz]	$S_t^*$ [MPa]	Pendientes [GPa]			Máximos		Áreas			$\xi_{Chopra}$ [%]
		E	P	R	$S_{LS}$ [MPa]	$e_{LS}$ [%]	$E_d$	$E_t$	$E_s$	
0,03	152	74	9	26	343	1,4	72	307	228	2,5
0,1	148	72	12	22	348	1,5	64	319	265	1,9
1	150	73	13	20	369	1,6	70	369	315	1,8
Curva tracción	174	53	-	-	733	8,8	-	-	-	-

\* al 0.02 % deformación

Las rectas utilizadas para determinar el esfuerzo de transformación en las curvas de histéresis se muestran en la figura 4.69.

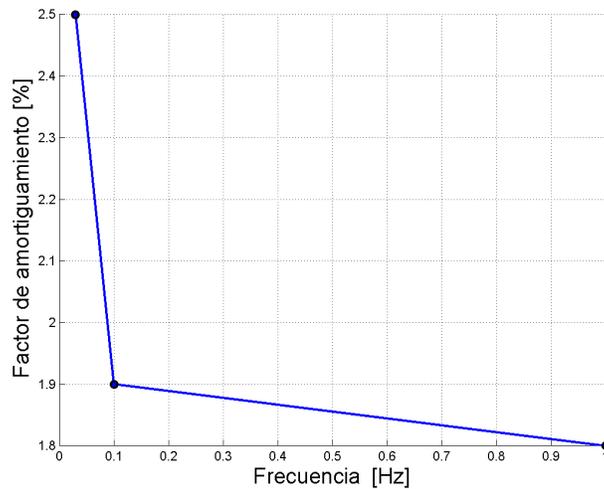


Figura 4.70: Influencia de la frecuencia en el factor de amortiguamiento  $\xi_{Chopra}$ .

De la literatura se sabe que al aumentar la velocidad (frecuencia) con que se tracciona un material, el límite de fluencia debiera aumentar, lo que se explica en que a grandes velocidades, el proceso de tracción en la probeta se puede considerar como adiabático [17], ya que el material no tiene el tiempo suficiente para disipar el calor generado con el aumento de la velocidad. Así, al tratarse de un proceso adiabático, aumenta la temperatura de la probeta y por consiguiente la curva debería trasladarse hacia arriba (el esfuerzo de transformación aumenta), fenómeno que no se observa, es más, de acuerdo al modelo probeta-resorte planteado en la sección 4.4.1, al aumentar la temperatura las curvas deberían alcanzar valores máximos de deformación menores, fenómeno que tampoco se ve. Estos comportamientos son los mismos observados por A. Vera en la mayoría de las curvas obtenidas a distintas frecuencias (ver figuras 6.18, 6.19 y 6.20 de ref. [18]).

En los ensayos de la sección anterior se encontró que mayoritariamente el factor de amortiguamiento decae con el aumento de la temperatura. Este resultado si es coincidente con el hecho de que el factor de amortiguamiento disminuya con el aumento de la frecuencia, ya que como se dijo, a mayores velocidades el proceso se torna adiabático en mayor medida, lo cual se traduce en el aumento de la temperatura en la probeta.

#### 4.4.5. Ensayos a igual velocidad promedio

Los resultados que se presentan en esta sección corresponden a ensayos cíclicos realizados con velocidades de desplazamiento promedio iguales, con lo cual se pretende observar la influencia de la velocidad de ensayo en el comportamiento del material. Todos los ensayos cíclicos anteriores (salvo el de la sección anterior) han sido realizados a una frecuencia de 1 Hz y se ha variado la deformación nominal impuesta, por lo tanto han sido ensayos a distintas velocidades. En este caso se manipulará la frecuencia y la deformación nominal de tal forma de alcanzar velocidades promedio iguales. Se habla de velocidad promedio, ya que el sistema de excéntricas impone un desplazamiento (deformación) sinusoidal a la probeta.

Los ensayos se realizaron a 25 °C, se utilizó una probeta de 115  $\mu\text{m}$  y se finalizó con ensayo de tracción a la fractura. Las combinaciones de frecuencia, deformación impuesta y su carrera correspondiente, que dan como resultado velocidades iguales, se muestran en la tabla 4.35, donde la velocidad se calcula como  $2 \cdot \text{carrera} \cdot \text{frecuencia}$ .

Tabla 4.35: Combinaciones de frecuencia y deformación.

Frecuencia [Hz]	Def. Nominal [%]	Carrera [mm]	Velocidad [mm/s]
1	0,8	0,43	0,86
0,39	1,5	1,11	0,86
0,25	2,2	1,73	0,86

En la figura 4.71 se presentan las curvas obtenidas. Se muestra el ciclo 1, 2 y 40 para cada una de las tres combinaciones de frecuencia y deformación y también se muestra un rango de la curva de tracción. En la tabla 4.36 se muestran los parámetros característicos calculados para el ciclo 2 de cada ensayo.

Se puede observar que las curvas se trasladan hacia abajo y hacia la derecha a medida que aumenta la deformación y disminuye la frecuencia, lo cual está de acuerdo con el resultado de la sección anterior.

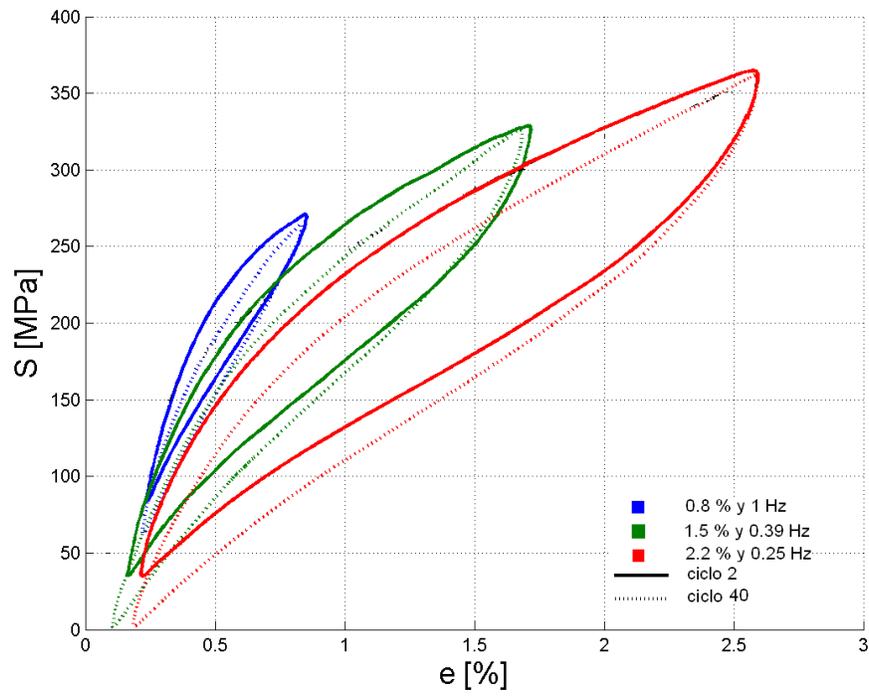
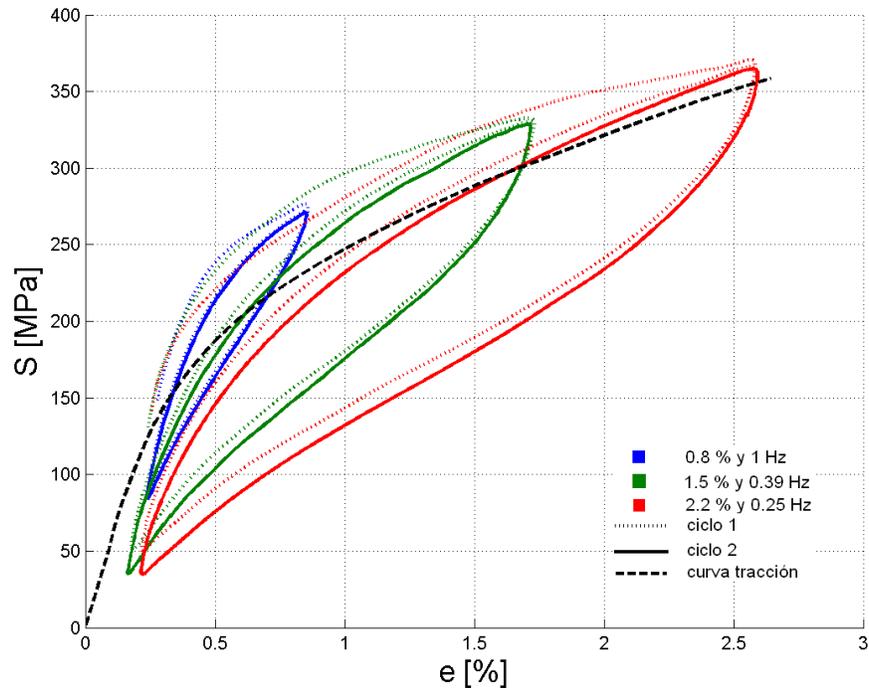


Figura 4.71: Curvas cíclicas a 25 °C, 115  $\mu\text{m}$ , a las frecuencias y porcentajes de deformación nominal indicados. Se muestran los ciclos 1, 2 y 40 y la curva de tracción.

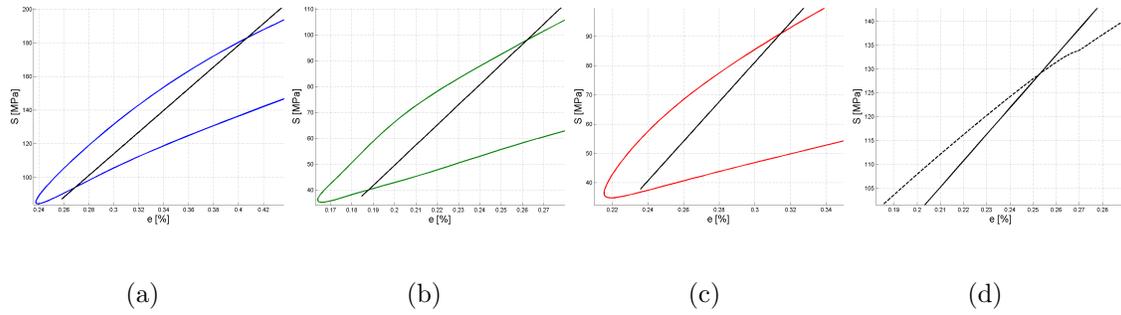


Figura 4.72: Esfuerzo de transformación ciclo 2 y curva de tracción: a) 0.8; b) 1.5; c) 2.2% deformación nominal; d) curva de tracción.

Tabla 4.36: Parámetros ensayo cíclico a 25 °C, 115  $\mu\text{m}$  e igual velocidad promedio.

Def. nom. [%]	Frec. nom. [Hz]	$S_t$ [MPa]	Pendientes [GPa]			Máximos		Áreas			$\xi_{Chopra}$ [%]
			E	P	R	$S_{LS}$ [MPa]	$e_{LS}$ [%]	$E_d$	$E_t$	$E_s$	
0,8	1	182	65	12	31	271	0,9	19	129	109	1,4
1,5	0,39	98	78	10	19	329	1,7	107	369	283	3,0
2,2	0,25	93	68	7	14	365	2,6	198	615	475	3,3
Curva tracción		129	55	-	-	735	10,1	-	-	-	-

\* al 0.02% deformación

Las rectas utilizadas para determinar el esfuerzo de transformación en las curvas de histéresis, se muestran en la figura 4.72.

## 4.5. Metalografías Post-Ensayos

A una probeta ensayada cíclicamente a 2.2% de deformación nominal (probeta usada en los ensayos presentados en la sección 4.4.1) y a la mayoría de las probetas ensayadas en tracción se le realizaron metalografías post-ensayo, con el propósito de ver si se logró formar martensita inducida por la aplicación de esfuerzos. En el caso de las probetas ensayadas a la fractura, las fotografías se tomaron en la *zona de fractura (Z.F.)* y en *zonas intermedias (Z.I.)* un poco más alejadas de ésta y a distintos aumentos, todo lo cual está indicado en cada imagen.

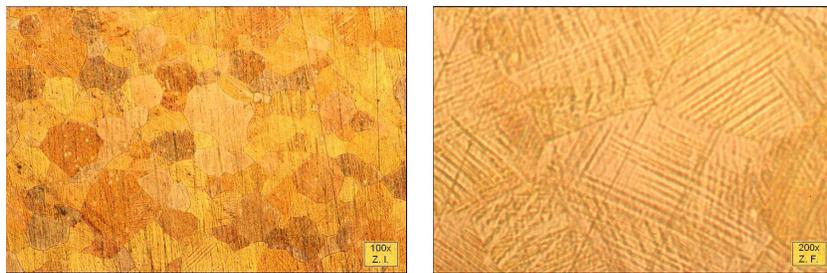


Figura 4.73: Probeta de 60  $\mu\text{m}$  ensayada en tracción a 50 °C.

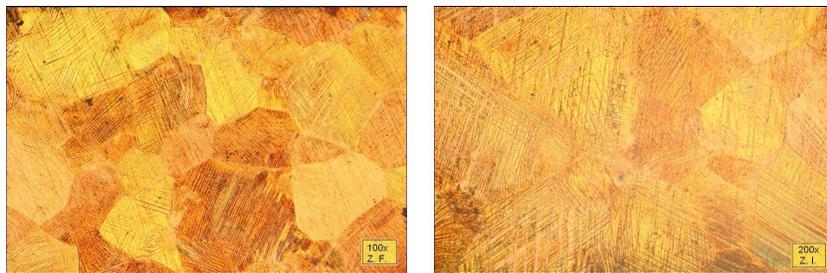


Figura 4.74: Probeta de 100  $\mu\text{m}$  ensayada en tracción a 50 °C.

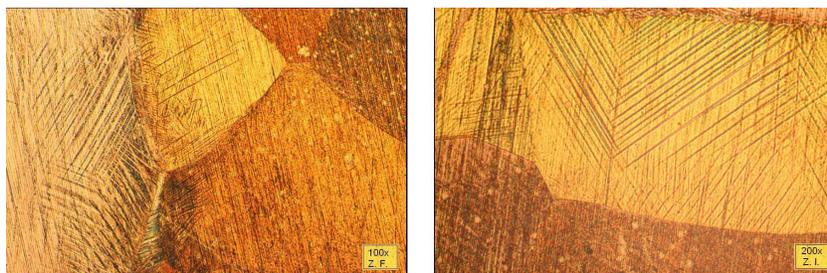


Figura 4.75: Probeta de 200  $\mu\text{m}$  ensayada en tracción a 50 °C, serie 1.

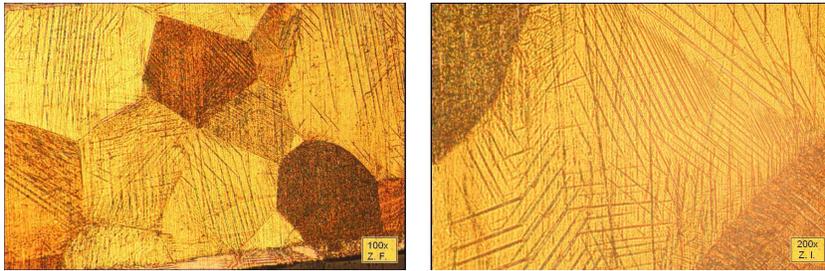


Figura 4.76: Probeta de 200  $\mu\text{m}$  ensayada en tracción a 50  $^{\circ}\text{C}$ , serie 2.

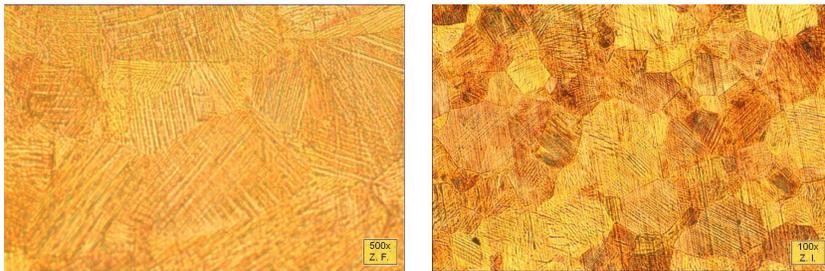


Figura 4.77: Probeta de 60  $\mu\text{m}$  ensayada en tracción a 20  $^{\circ}\text{C}$ .

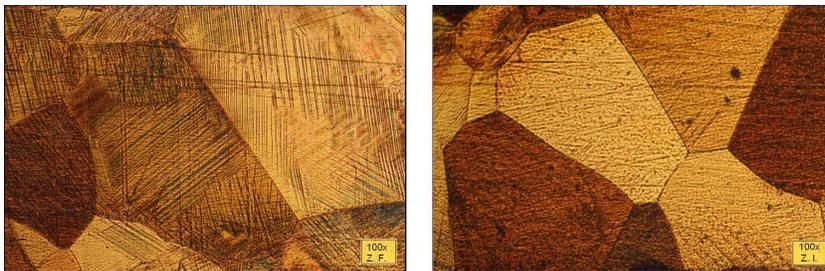


Figura 4.78: Probeta de 115  $\mu\text{m}$  ensayada en tracción a 6  $^{\circ}\text{C}$ , serie 1.

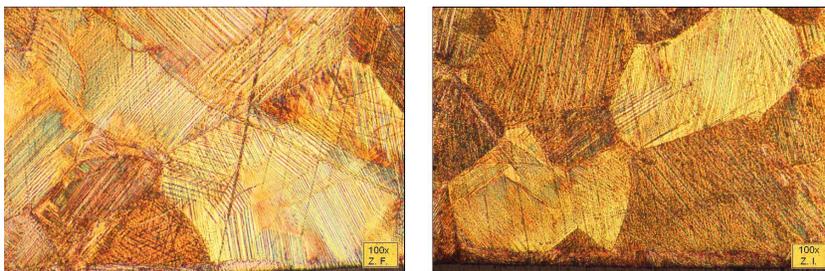


Figura 4.79: Probeta de 115  $\mu\text{m}$  ensayada en tracción a 6  $^{\circ}\text{C}$ , serie 2

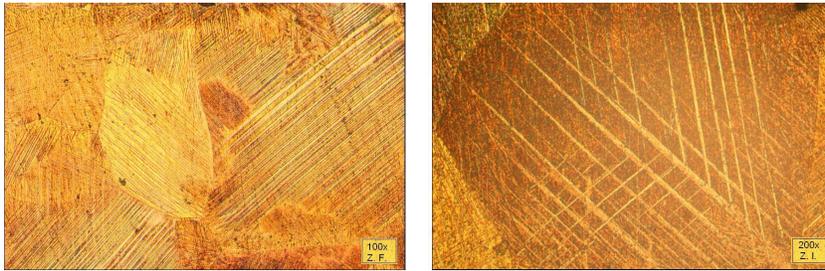


Figura 4.80: Probeta de 115  $\mu\text{m}$  ensayada en tracción a 6 °C, serie 3

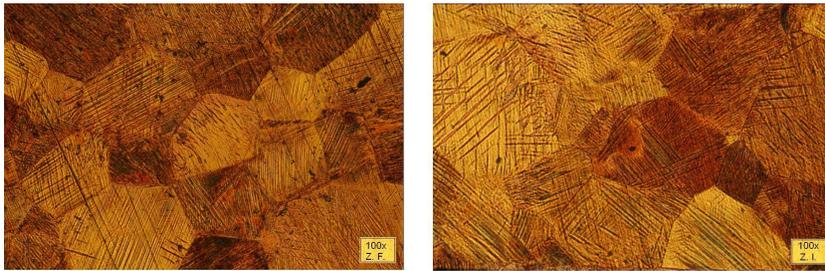


Figura 4.81: Probeta de 115  $\mu\text{m}$  ensayada en tracción a 20 °C, serie 1

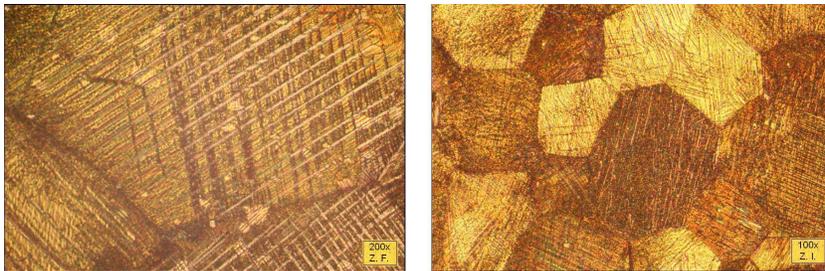


Figura 4.82: Probeta de 115  $\mu\text{m}$  ensayada en tracción a 20 °C, serie 2

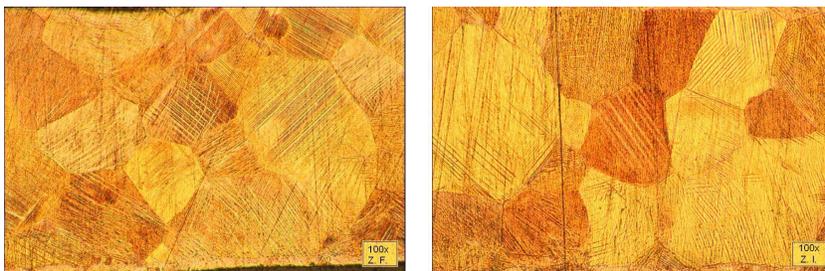


Figura 4.83: Probeta de 115  $\mu\text{m}$  ensayada en tracción a 20 °C, serie 3

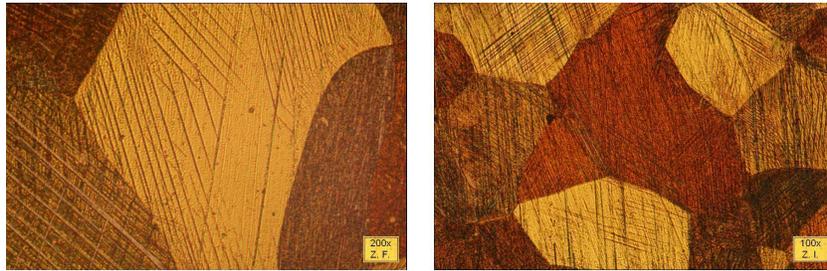


Figura 4.84: Probeta de 115  $\mu\text{m}$  ensayada en tracción a 50 °C, serie 1



Figura 4.85: Probeta de 115  $\mu\text{m}$  ensayada en tracción a 50 °C, serie 2

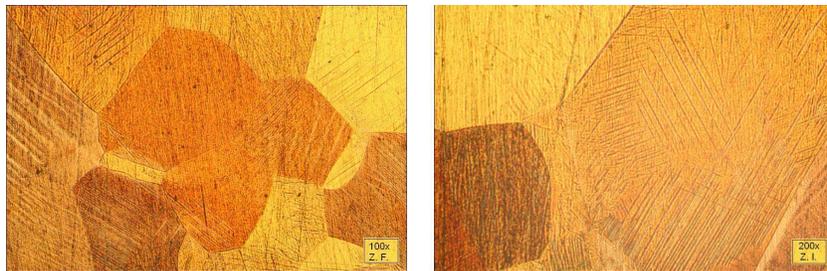


Figura 4.86: Probeta de 200  $\mu\text{m}$  ensayada cíclicamente a 25 °C y deformaciones: 0.8, 1.5 y 2.2%. Se finalizó con ensayo a la fractura.



Figura 4.87: Probeta de 200  $\mu\text{m}$  ensayada cíclicamente a 2.2% deformación a temperaturas: 6, 25, 50, 6, 25, 50  $^{\circ}\text{C}$

En todas las metalografías de las probetas ensayadas en tracción a la fractura se observa la presencia de martensita retenida, tanto en las zonas intermedias como en la zona de fractura, lo cual es lógico de esperar cuando se somete una aleación superelástica a deformaciones que están más allá de su límite superelástico.

Al observar la metalografía de la probeta ensayada cíclicamente (figura 4.87) se evidencia la presencia de martensita retenida (ver las agujas), esto contrariamente a lo informado por C. Mir, que en ninguna de las probetas que ensayó cíclicamente (a 0.8, 1.5 y 2.2%) observó martensita retenida. Esto sugiere que en realidad el límite superelástico de la aleación está cercano a 2.2%, aunque debe considerarse que en realidad se alcanzaron deformaciones efectivas más allá del 2.2% (ver figuras 4.36, 4.37 y 4.38), más bien cercanas al 2.4%.

## Capítulo 5

# Conclusiones

### 5.1. Ensayos a la Fractura

A partir de las discusiones de resultados realizadas en cada sección para los diferentes ensayos a la fractura, se pueden obtener las siguientes conclusiones generales:

1. Del análisis del conjunto completo de las 12 curvas de tracción presentadas en la sección 4.3.5, se desprenden las siguientes afirmaciones generales: el esfuerzo de transformación crece al aumentar la temperatura, lo cual hace que la curva se traslade hacia arriba, pero este efecto de la temperatura afecta sólo en el rango aproximado de 0 a 5% de deformación, luego del cual las curvas tienden nuevamente a cruzarse y/o juntarse. A partir de este comportamiento se puede concluir que la temperatura afecta sólo el rango superelástico y no el rango en que la martensita se deforma plásticamente, que corresponde a la deformación de un material clásico. Los valores de esfuerzo y deformación máxima alcanzados no siguen una tendencia definida con la variación de la temperatura.

Por otro lado el esfuerzo de transformación crece al disminuir el tamaño de grano, lo cual hace que la curva se traslade hacia arriba, efecto que influencia toda la curva, a diferencia de la temperatura que afecta sólo un determinado rango. A partir de este comportamiento se puede concluir que el tamaño de grano afecta tanto el rango superelástico, como el rango en que la martensita se deforma plásticamente hasta la fractura. La tendencia de los valores del esfuerzo y deformación máxima es a aumentar con la disminución del tamaño de grano.

2. Con respecto a los ensayos a la fractura de probetas que previamente fueron ensayadas en forma cíclica, se puede concluir lo siguiente: sus curvas de tracción presentan el mismo comportamiento con la temperatura y el tamaño de grano, en términos forma y parámetros característicos, que las curvas sin ciclado previo descrito en el punto anterior.

Por otro lado, para cada valor de temperatura y tamaño de grano considerado, los valores del esfuerzo de transformación de las probetas con ciclado previo son menores en un valor cercano al 40% con respecto a los valores que muestran las probetas sin ciclado previo. Debido a esto, en el rango aproximado de 0 a 2%, las curvas de tracción de probetas cicladas se encuentran siempre debajo de las curvas de probetas sin ciclado previo. Lo anterior sugiere que el comportamiento superelástico del material de aleación es función del historial de la probeta y/o su recuperación requiera un determinado tiempo, mayor al transcurrido entre la finalización del ciclado previo y el comienzo del ensayo a la fractura de este caso, que fue alrededor de 20 minutos.

3. Del análisis de los ensayos realizados para ver la repetibilidad de los ensayos a la fractura utilizando material de aleación, se puede afirmar lo siguiente: los ensayos a 50 °C son totalmente repetibles. Los ensayos a 20 °C también se consideran repetibles y las diferencias en las formas y parámetros de las curvas se explican por la alta dispersión en el tamaño de grano. En el caso de las curvas obtenidas a 6 °C, las tres presentan valores similares de esfuerzo de transformación, sin embargo las curvas de la primera y la tercera serie se separan de la curva de la segunda serie, alcanzando valores máximos de esfuerzo y deformación muy diferentes, en lo cual puede influir la poca cantidad de granos por diámetro de la probeta, que a su vez influye en que no se presente la propiedad de isotropía por compensación.
4. En general se observaron diferencias en los valores del módulo de elasticidad, tanto en las curvas de tracción como en las curvas cíclicas. Este comportamiento se puede atribuir a la poca cantidad de granos por diámetro de la probeta, lo cual influye en que el material no presente isotropía por compensación y se obtengan dichas diferencias.

## 5.2. Ensayos Cíclicos

A partir de las discusiones de resultados realizadas en cada sección para los diferentes ensayos cíclicos, se pueden obtener las siguientes conclusiones generales:

1. Con respecto a la repetición del ensayo realizado con una probeta de tamaño de grano de  $200 \mu\text{m}$ , a una deformación nominal impuesta de 2.2 % y a temperatura variable, se puede afirmar lo siguiente: las curvas de histéresis se ordenan en forma ascendente al aumentar la temperatura, lo cual es resultado del aumento del esfuerzo de transformación con la temperatura.

Los valores del factor de amortiguamiento disminuyen al aumentar la temperatura, lo cual es importante de tener en cuenta dado el objetivo de utilizar el material como disipador sísmico.

Con una amplitud de oscilación fija, el valor máximo de deformación alcanzado por la curva disminuye al aumentar la temperatura, debido al endurecimiento de ésta con la temperatura.

Después de ciclar, al observar la metalografía post-ensayo realizada a la probeta, se pudo notar la presencia de martensita retenida, lo cual sugiere que el límite superior superelástico está antes del 2.2 % de deformación.

2. Con respecto a los ensayos cíclicos a tamaños de grano y temperaturas fijas y con deformación variable, se concluye lo siguiente: el esfuerzo de transformación (y toda la curva) tiene una tendencia a decaer con el aumento de la amplitud de deformación, disminuye con el aumento del tamaño de grano y crece con el aumento de la temperatura. Este comportamiento es coincidente con aquel informado por C. Mir.

El comportamiento del factor de amortiguamiento, al variar los parámetros de ensayo, es el siguiente: tiene una tendencia a aumentar con el aumento de la amplitud de deformación, crece con el aumento del tamaño de grano y decrece con el aumento de la temperatura.

3. Con respecto a los ensayos con frecuencia variable, se puede concluir lo siguiente: los valores del esfuerzo de transformación no presentan una tendencia definida al variar la frecuencia, más bien no cambian con la variación de ésta, al contrario de los valores del factor de amortiguamiento que decrecen al aumentar la frecuencia.

Dos comportamientos que son contradictorios respecto a lo esperado desde el punto de vista de la teoría son los siguientes: no se observa un ordenamiento vertical claro de las curvas con la frecuencia, aunque la curva a menor frecuencia tiende a estar por sobre las otras dos y los valores máximos de deformación alcanzados crecen al aumentar la frecuencia. Se propone estudiar este fenómeno en una memoria posterior.

# Bibliografía

- [1] C. Mir. 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, 2005, Universidad de Chile.
- [2] A. Sepúlveda, C. Mir, M. O. Moroni y R. Araya. Efecto de la Temperatura y Tamaño de Grano Sobre el Comportamiento Bajo Cargas Cíclicas de una Aleación Cu-Al-Be, Considerando Aplicaciones Antisísmicas. Congreso Binacional Chile-Argentina, CONAMET/SAM 2006.
- [3] S. Montecinos, M. Moroni, A. Sepúlveda. Superelastic Behavior and Damping Capacity of CuAlBe Alloys, *Materials Science and Engineering*.
- [4] K. Otsuka and C.M. Wayman. *Shape Memory Materials*. Ed. Otsuka and Wayman, Chichester, Cambridge University Press, Cambridge.
- [5] M. Dolce, D. Cardone. Mechanical Behavior of Shape Memory Alloys for Seismic Applications. Austenite NiTi Wires Subjected to Tension. *International Journal of Mechanical Sciences* N° 43, 2001.
- [6] R. Herrera. Máquina para Ensayar Probetas de Goma a Corte Directo. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, 1998, Universidad de Chile.
- [7] A. Escandar. Efecto de la Temperatura en las Propiedades Mecánicas de Gomas de Alto Amortiguamiento. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, 2003, Universidad de Chile.
- [8] P. Gollot. Fabricación y Ensayo de Aleaciones de Cobre con Memoria de Forma (SMA) Superelásticas. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, 2003, Universidad de Chile.

- [9] C. Adasme. Transformaciones de Fase y Comportamiento Mecánico de una Aleación Comercial CuAlBe. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, 2001, Universidad de Chile.
- [10] Y. Liu, J. Van Humbeeck. On the Damping Behaviour of NiTi Shape Memory Alloys. J. Phys. IV, France, 7 (C5) (1997), pp. 519-524.
- [11] A. Chopra. Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering. Ed. Prentice Hall, Second Edition, 2001, pp. 99-104.
- [12] <http://www.matweb.com/search/SearchProperty.asp>
- [13] W. Hayden, W. G. Moffatt and J. Wulff. Propiedades Mecánicas, Ed. Limusa-Willey, Primera edición, 1968, pp. 38-43.
- [14] <http://es.wikipedia.org/wiki/Trefilado>
- [15] S. Montecinos, A. Cuniberti and A. Sepúlveda. Grain size and superelastic behavior of a CuAlBeAl. submitted to Materials Characterization (2005).
- [16] C. E. Chialvo. Efectos Termoeléctricos Teoría Básica y Aplicaciones. Monografía final, 2004. Universidad Nacional de Cuyo.
- [17] G. E. Dieter. Metalurgia Mecánica. Primera Edición, 1967, pp. 270-276.
- [18] A. Vera. Caracterización de una Aleación Superelástica CuZnAl Extruida, Considerada para Disipadores de Energía Sísmica. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, 2007, Universidad de Chile.

## Apéndice A

# Intervalo de confianza para la media poblacional $\mu$

Sean  $U, V$  dos variables aleatorias (v.a.) independientes tales que  $U$  se distribuye según una función de densidad normal de media 0 y varianza 1 ( $N(0,1)$ ) y  $V$  según una Chi-cuadrada de  $n-1$  grados de libertad ( $\chi_{n-1}^2$ ), entonces la v.a.  $T$ , definida en la siguiente expresión, se distribuye según una función densidad T-Student a  $n-1$  grados de libertad ( $t_{n-1}$ ), es decir:

$$T \equiv \frac{U}{\sqrt{V/(n-1)}} \rightarrow t_{n-1} \quad (\text{A.1})$$

Sean  $X_1, \dots, X_n$  una muestra de una variable aleatoria  $X$  de media  $\mu$  y varianza  $\sigma$ . El promedio  $\bar{X}$  y la varianza muestral  $S_n^2$  son también variables aleatorias y cumplen los siguientes resultados:

$$U \equiv \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \rightarrow N(0,1) \quad (\text{A.2})$$

Que es una buena aproximación para  $n \geq 30$ , independiente de la distribución de los  $X_j$ .

$$V \equiv \frac{nS_n^2}{\sigma^2} \rightarrow \chi_{n-1}^2 \quad (\text{A.3})$$

Reemplazando en  $T$  se tiene:

$$T = \frac{(\bar{X} - \mu)}{S_{n-1}/\sqrt{n}} \rightarrow t_{n-1} \quad (\text{A.4})$$

Donde:

$$S_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (\text{A.5})$$

$$S_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (\text{A.6})$$

Se quiere encontrar el intervalo de confianza más pequeño para la media poblacional  $\mu$  con un nivel de confianza  $1-\alpha$  conocido (usualmente  $\alpha=0.05$ ), es decir:

$$P(a \leq \mu \leq b) = 1 - \alpha \quad (\text{A.7})$$

Sumando y restando términos en la desigualdad, se puede llegar a formar la variable aleatoria T:

$$P\left(\underbrace{\frac{\bar{X} - b}{S_{n-1}/\sqrt{n}}}_{\equiv t_1} \leq \underbrace{\frac{\bar{X} - \mu}{S_{n-1}/\sqrt{n}}}_{= T} \leq \underbrace{\frac{\bar{X} - a}{S_{n-1}/\sqrt{n}}}_{\equiv t_2}\right) = 1 - \alpha \quad (\text{A.8})$$

Es decir:

$$P(t_1 \leq T \leq t_2) = 1 - \alpha \quad (\text{A.9})$$

T sigue una función de distribución T-student  $t_{n-1}$ , la cual es simétrica con respecto al origen. Se quiere determinar el intervalo más pequeño  $[a,b]$  para  $\mu$  lo que es equivalente a que el intervalo  $[t_1,t_2]$  sea mínimo. En el caso de distribuciones simétricas el intervalo de largo más pequeño es aquel simétrico con respecto al origen, es decir  $t_1 = -t_2$ , es decir:

$$P(-t_2 \leq T \leq t_2) = 1 - \alpha \quad (\text{A.10})$$

Lo que es equivalente a:

$$P(t_2 \leq T) = \alpha/2 \quad (\text{A.11})$$

Con lo cual se puede determinar  $t_2 = -t_1$  de la tabla de la función T-student, y con las ecuaciones que definen  $t_1$  y  $t_2$  se puede encontrar a y b que determinan el intervalo de confianza  $[a,b]$ .

## Apéndice B

### Códigos de funciones Matlab utilizados

Las principales funciones Matlab que fueron creadas para el tratamiento de los datos son las que se presentan a continuación.

1. La siguiente función suaviza el registro de datos que se encuentra matricialmente en  $A$ , donde la primera columna son los datos capturados por el extensómetro y la segunda los datos de la celda de carga. Cada dato es suavizado como el promedio de  $largo$  datos, esto se realiza  $nveces$  y hasta el dato  $k$ . El código de esta función es el que sigue:

```
function R=suaviza(A,largo,k,nveces)
if (rem(largo,2) > 0)
disp('el LARGO debe ser par');
R=-1;
return
else
col1=A(:,1);
c1=col1(1:k);
col2=A(:,2);
c2=col2(1:k);
n=1;
while(n <= nveces)
for i=1:largo/2
c1(i)=mean(c1(1:i+i-1));
```

```

c2(i)=mean(c2(1:i+i-1));
end
for m=(1+largo/2):1:k-((largo/2)+1)
c1(m)=mean(c1(m-largo/2:m+largo/2));
c2(m)=mean(c2(m-largo/2:m+largo/2));
end
for j=k-(largo/2):1:k
c1(j)=mean(c1(j-(k-j):k));
c2(j)=mean(c2(j-(k-j):k));
end
n=n+1;
end
R=[c1 c2];
end

```

2. La siguiente función obtiene el rango de datos válidos entre  $k$  y  $j$  de la matriz  $A$ :

```

function B=datosvalidos(A,k,j)
c1=A(:,1);
c2=A(:,2);
col1=c1(k:j);
col2=c2(k:j);
B=[col1 col2];

```

3. La siguiente función convierte los datos voltaicos entregados por el extensómetro y la celda de carga en deformación unitaria y esfuerzo respectivamente.  $v1$  es el voltaje inicial del extensómetro.

```

function C=curvaEsfDef(B,v1)
n=length(B(:,1));

```

```

loext=25;
Ao=1.963e-7;
C=zeros(n,3);
for i=1:1:n
C(i,1)=(((0.703*B(i,1)+24.338)-(0.703*v1+24.338))/loext);
C(i,2)=((B(i,2)*62.208)*9.8)/(Ao*106);
end

```

4. La siguiente función realiza una regresión lineal de los vectores columnas  $x$  e  $y$ , para determinar una expresión del tipo  $y = a + b * x$ . Se usa para determinar el valor del Módulo de Young  $E = b$ , en el tramo lineal inicial del registro. También entrega la correlación  $r^2$  de la regresión.

```

function [a,b,r2,r]=linreg(x,y)
n=length(x);
b=(x'*y-n*mean(x)*mean(y))/(x'*x-n*(mean(x))^2);
a=mean(y)-b*mean(x);
yaprox=a+b*x;
SST=(y-mean(y))'*(y-mean(y));
SSE=(yaprox-mean(y))'*(yaprox-mean(y));
SSR=(y-yaprox)'*(y-yaprox);
r2=1-(SSR/SST);
r=sqrt(r2);

```

5. La siguiente función sirve para determinar el esfuerzo de transformación de una curva de tracción  $x,y$ , con módulo elástico  $E$ . Lo que hace es trazar una recta de pendiente  $E$  trasladada en  $p\%$  de deformación (en porcentaje) desde el origen.

```

function []=esfTransfr(x,y,E,p)
v1=(0:0.009/200:0.009)';

```

```

v2=E*103*v1;
hold on
grid on
xlabel('e [%]','FontSize',18)
ylabel('S [MPa]','FontSize',18)
plot(100*x,y,'black','LineWidth',2);
plot(100*(v1+p/100),v2,'red','LineWidth',2);

```

6. La siguiente función calcula los siguientes parámetros cíclicos (ver sección correspondiente): la rigidez secante del ciclo  $R$ , el esfuerzo y deformación máxima  $maxEsf$  y  $maxDef$  respectivamente, y las áreas  $E_d$   $E_t$   $E_s$ .  $SC$  es la matriz de  $n \times 2$  en que va el ciclo,  $C(1,2)$  es la pretensión (en MPa) y  $E$  es la pendiente (en GPa) inicial del registro.  $C(1,2)$  y  $E$  son los parámetros para realizar la corrección propuesta en la sección ??.

```

function [R,maxEsf,maxDef,Ed,Et,Es]=paramciclicos(SC,C(1,2),E)
V=[SC(:,1)+C(1,2)/(E*103) SC(:,2)];
n=length(V(:,1));
for i=4:1:n-3
if ((V(i,1) <= V(i-1,1)) && (V(i,1) <= V(i-2,1)) && (V(i,1) <= V(i-3,1))
&& (V(i,1) <= V(i+1,1)) && (V(i,1) <= V(i+2,1)) && (V(i,1) <= V(i+3,1)))
imind=i;
end
end
for i=4:1:n-3
if ((V(i,1) >= V(i-1,1)) && (V(i,1) >= V(i-2,1)) && (V(i,1) >= V(i-3,1))
&& (V(i,1) >= V(i+1,1)) && (V(i,1) >= V(i+2,1)) && (V(i,1) >= V(i+3,1)))
imaxd=i;
end
end
for i=4:1:n-3
if ((V(i,2) <= V(i-1,2)) && (V(i,2) <= V(i-2,2)) && (V(i,2) <= V(i-3,2))

```

```

&& (V(i,2) <= V(i+1,2)) && (V(i,2) <= V(i+2,2)) && (V(i,2) <= V(i+3,2)))
imine=i;
end
end
for i=4:1:n-3
if ((V(i,2) >= V(i-1,2)) && (V(i,2) >= V(i-2,2)) && (V(i,2) >= V(i-3,2))
&& (V(i,2) >= V(i+1,2)) && (V(i,2) >= V(i+2,2)) && (V(i,2) >= V(i+3,2)))
imaxe=i;
end
end
As=0;
for i=imind+1:1:imaxd
As=As + abs(V(i,1)-V(i-1,1))*(V(i,2)+V(i-1,2))/2;
end
Ai=0;
for i=2:1:imind
Ai=Ai + abs(V(i-1,1)-V(i,1))*(V(i,2)+V(i-1,2))/2;
end
ifin=n;
for i=imaxd:1:n
if (V(i,1)<= V(1,1))
ifin=i;
end
end
for i=imaxd+1:1:ifin
Ai=Ai + abs(V(i-1,1)-V(i,1))*(V(i,2)+V(i-1,2))/2;
end
Ed=100*(As-Ai);
Et=100*As;
Es=100* ((V(imaxd,1)-V(imind,1))*V(imine,2) + ((V(imaxd,1)-V(imind,1))*(V(imaxe,2)-
V(imine,2))))/2);
R=(V(imaxe,2)-V(imine,2))/((V(imaxe,1)-V(imine,1))*103);

```

```
maxEsf=V(imaxe,2);  
maxDef=V(imaxd,1)*100;
```