

01173



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA INDUCIDA POR ESFUERZO BAJO UN ESTADO DE ESFUERZO PLANO.”

PROYECTO FINAL

Que para obtener el Título de:

Maestro en Ingeniería

Presenta:

Ing. José Antonio Souza Jiménez

Asesor de Tesis: M. En I. Jacinto Cortés Pérez.



MÉXICO

2005

m 346548

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

SOUZA JIMENEZ, JOSE ANTONIO

0003



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso


DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	2
CONFORMADO DE MUESTRAS	2
TRATAMIENTO TÉRMICO.	3
TEMPERATURAS DE TRANSFORMACIÓN	3
INSTRUMENTACIÓN DE LAS MUESTRAS	3
PRUEBAS DE CARGA	5
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	8
RESPUESTA MECÁNICA EN FUNCIÓN DE LA DIRECCIÓN	8
ESTADO DE ESFUERZO DIVERSO	9
PRUEBA DE FLEXIÓN	9
PRUEBA DE FLEXIÓN-TORSIÓN	11
CONCLUSIONES	15
REFERENCIAS	16

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: José Antonio Solís
Fecha: 3-08-05
FIRMA: 

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURAS

Figura 1. Criterios de la superficie de transformación inicial a) Cu-Al-Be: b)NiTi	2
Figura 2. Diagrama esquemático del tratamiento térmico llamado betatizado [16]	3
Figura 3. a) Barra prismática instrumentada F1 b) Sección longitudinal, ubicación de los cinturones de extensómetros b) Sección transversal, ubicación de los extensómetros alrededor de la barra.	4
Figura 4. a) Viga instrumentada (F2, F3 ,F4) b) Ubicación de los extensómetros en la parte superior e inferior de la viga sobre la sección longitudinal.	5
Figura 5. a) barra instrumentada sujeta a flexión y flexión – torsión. b) viga instrumentada sujeta a flexión.	6
Figura 6. Monitoreo de las deformaciones con el sistema de adquisición de datos VISHAY 6200 a) prueba de flexión b) prueba de flexión-torsión	6
Figura 7. Parámetros utilizados para calcular el primer momento de área de la sección transversal de la barra.	7
Figure 8 Lazo superelástico de las vigas (F2, F3, F4) sujetas a flexión, comportamiento en tensión a) viga F3; b) viga F2; c) viga F4.	8
Figura 9. Curvas carga-microdeformación del primer y segundo cinturón de strain gages. x1,x2, respectivamente de la barra; a) curvas pseudoelásticas de cada strain gage correspondientes b) al primer cinturón, x1; b) a) curvas pseudoelásticas de c) cada strain gage correspondientes al segundo cinturón. x2.	9
Figura 10. Plano $\sigma_1 - \sigma_2$ para la prueba de flexión a) primer cinturón de extensómetros; b) segundo cinturón de extensómetros	11

Figura 11. Plano $\sigma_1 - \sigma_2$ para la prueba de flexión-torsión. brazo de palanca menor a) primer cinturón de extensómetros; b) segundo cinturón de extensómetros

14

Figura 12. Plano $\sigma_1 - \sigma_2$ para la prueba de flexión-torsión. brazo de palanca mayor a) primer cinturón de extensómetros; b) segundo cinturón de extensómetros.

15

TABLAS

Tabla 1 temperaturas de transformación de las muestras

3

Tabla 2-. Dimensiones de las muestras

5

Tabla 3. Cargas críticas

8

Tabla 4. Valores críticos de carga y esfuerzo correspondientes al primer y segundo cinturón de extensómetros en la barra.

10

Tabla 5. Valores críticos de carga y esfuerzo correspondientes al primer y segundo cinturón de extensómetros de la barra, considerando un brazo de palanca de 0.02625 m.

13

Tabla 6. Valores críticos de carga y esfuerzo correspondientes al primer y segundo cinturón de extensómetros de la barra. considerando un brazo de palanca de 0.0377 m.

14

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA INDUCIDA POR ESFUERZO BAJO UN ESTADO DE ESFUERZO PLANO

INTRODUCCIÓN

Actualmente existe un gran interés en el comportamiento termomecánico de los materiales con memoria de forma (MMF) por sus posibles aplicaciones ingenieriles en dispositivos inteligentes. El comportamiento que presentan estos materiales es muy complejo de predecir ya que es no lineal, anisótropo y dependiente de la temperatura. Como se ha reportado anteriormente, el comportamiento termomecánico generalmente se debe a la transformación martensítica que presentan estos materiales, esta transición puede ser obtenida por enfriamiento, esfuerzo o ambos así como también por campo magnético. Los efectos que presentan estos materiales son: el efecto de memoria simple (EMS), el doble efecto de memoria, el efecto combinado y el efecto superelástico. Desde el punto de vista de aplicaciones, dos de los efectos más interesantes de los MMF, debido a que el material es capaz de presentar dos formas predeterminados al pasar por cierta temperatura crítica, son: el llamado doble efecto memoria de forma y el efecto combinado. El primero requiere un tratamiento termomecánico mientras que el segundo requiere solamente que el elemento mecánico soporte una carga durante su operación. Es claro que para diseñar dispositivos que aprovechen las propiedades de los MMF es necesario contar con criterios de diseño eficientes que permitan calcular al menos, el comportamiento de elementos mecánicos simples. En particular, predecir el comportamiento termomecánico de MMF policristalinos es hoy en día uno de los objetivos principales de diversos investigadores dedicados al estudio de MMF [11-15]. Lo anterior es debido a que para el desarrollo de aplicaciones de los MMF empleando monocristales resulta muy costoso [2-10].

Es claro que una de las principales complicación del comportamiento de MMF es la anisotropía mecánica la cual tiene dos aspectos importantes: a) la deformación transformacional y b) el esfuerzo crítico. Existen muchos estudios sobre el comportamiento mecánico de aleaciones con memoria de forma base cobre donde se encontró gran dependencia de la deformación transformacional con la orientación cristalográfica, variaciones desde 1% hasta 8% fueron encontradas en aleaciones Cu-Al-Ni y Cu-Al-Be; también Comstock et al. ha reportado que el esfuerzo crítico efectivo en casos de carga proporcional y no proporcional en la condición de esfuerzo plano, depende de la orientación cristalográfica para aleaciones de Ni-Ti, Cu-Ni-Al y Ni-Al [12-14]. La anisotropía y los efectos de microestructura hacen que el comportamiento que las aleaciones con memoria de forma (AMF) policristalinas, sea muy difícil de predecir. Algunos autores han encontrado relación con la ley de Hall-Pech, entre el tamaño de grano y el esfuerzo crítico en pruebas de tensión simple para aleaciones de Cu-Al-Ni and Cu-Zn-Al. Además para diversas AMF algunos autores han reportado diferentes tipos de martensita inducida por diferentes tipos de prueba, mediciones de tensión o compresión.

Recientemente Bouvet et al reportó un estudio experimental en un policristal de Cu-Al-Be, acerca del esfuerzo crítico efectivo bajo diferentes condiciones de esfuerzo plano en el caso de carga proporcional y no proporcional [9].

Los resultados de este estudio muestran que el criterio de transformación difiere mucho

del criterio típico de cadencia de Von Mises fig. 1-a y del criterio de Patoor et al [15]. L. Orgéas and D. Favier sugieren un criterio de cadencia basado en la tercer invariante del tensor de distorsión en policristales de NiTi fig 1-b, Huang et al propuso un criterio de esfuerzo crítico principal el cual fue empleado para predecir el comportamiento de una aleación con memoria de forma policristalina texturizada [3]. Además, encontraron cierta asimetría en las pruebas de tensión y compresión. Sin embargo Sittner et al [4] encontró un comportamiento simétrico en un policristal de Cu-Zn-Al. Estudios en monocristales de Ni-Al y Cu-Al-Ni bajo un estado de esfuerzos planos fueron realizados por Buchheit et al mostrando la existencia de algunas direcciones cristalográficas donde el comportamiento permanece simétrico cuando los ejes principales coinciden con las direcciones $[001]$ - $[010]$ y algunas otras direcciones $[011]$ - $[0\bar{1}1]$ y $[111]$ - $[0\bar{1}1]$ donde domina la asimetría [12,13].

El presente trabajo estudia los esfuerzos efectivos necesarios para inducir la transformación martensítica en muestras policristalinas de Cu-Al-Be cuando el esfuerzo aplicado se origina en probetas en un arreglo de cantilever. Los resultados serán comparados con los de la literatura.

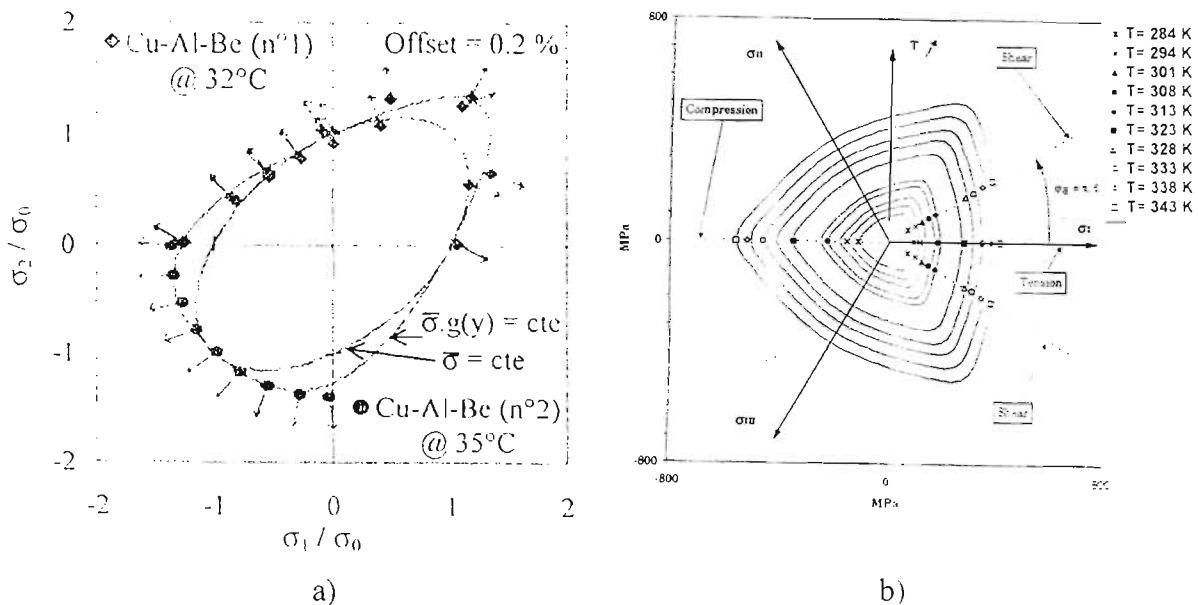


Figura 1. Criterios de la superficie de transformación inicial a) Cu-Al-Be; b) NiTi

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

CONFORMADO DE MUESTRAS

La aleación estudiada en el presente trabajo fue de Cu-Al-Be, La composición fue Cu-12at.%Al-0.5at%Be. dicha aleación fue obtenida en un horno de inducción de atmósfera controlada con argón. Para observar la anisotropía que se ha reportado en la literatura para los MMF se fabricó y laminó un pequeño lingote de Cu-Al-Be, obteniendo un espesor final de 1mm, del cual se extrajeron tres muestras, cada una con orientación diferente respecto a la dirección de laminado (0° , 90° y 45°). Estas muestras fueron ensayadas en un arreglo en cantilever con una carga puntual en el extremo libre. Se fabricó una barra prismática de sección circular para someterla a flexión y flexión-torsión en un arreglo en cantilever con carga puntual en el extremo libre, con el fin de realizar el estudio del esfuerzo efectivo crítico para inducir la transformación

martensítica en un estado de esfuerzos planos.

TRATAMIENTO TÉRMICO

Todas las muestras fueron homogenizadas después de ser fabricadas mediante un tratamiento térmico llamado betatizado, el cual consistió en un calentamiento de 650 °C durante 15 minutos, un enfriamiento en agua a una temperatura de 100 °C aproximadamente durante 20 minutos y finalmente un enfriamiento al aire libre fig.2.

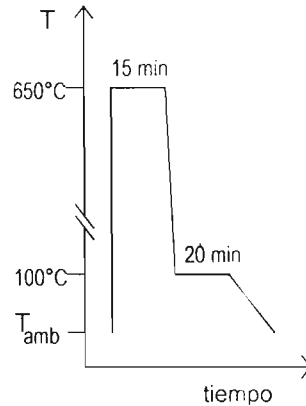


Figura 2. Diagrama esquemático del tratamiento térmico llamado betatizado [16].

TEMPERATURAS DE TRANSFORMACIÓN

Todas las transformaciones de tipo martensítico tienen temperaturas características que definen los puntos de inicio y fin de la transformación

Las temperaturas M_S y M_F corresponden al principio y al fin de la transformación directa (de austenita a martensita). De la misma manera las temperaturas A_S y A_F están definidas como el principio y fin de la transformación inversa (de martensita a austenita). En las aleaciones metálicas estos cuatro puntos de transformación dependen esencialmente de la composición química y del historial térmico de las aleaciones.

Para determinar estas temperaturas mostradas en la tabla 1 se realizaron mediciones de resistencia eléctrica, usando la técnica de resistividad de cuatro puntos.

Tabla 1 temperaturas de transformación de las muestras

Cu-Al-Be	M_S (°C)	M_F (°C)	A_S (°C)	A_F (°C)
Barra (F1)	-50.1	-70.2	-49.5	-36.3
Vigas (F2,F3,F4)	1.5	-21.7	-12.5	-14.1

INSTRUMENTACIÓN DE LAS MUESTRAS

El método experimental utilizado para el análisis de esfuerzos fue el de extensometría eléctrica, de tal modo que cada una de las muestras fue instrumentada con extensómetros (VISHAY EA-13-60LZ-120). Las muestras se identifican de la siguiente

manera: F1 es la barra prismática de sección transversal circular, F2, F3 y F4 son las pequeñas vigas con 0°, 45° y 90° de orientación respecto a la relación a la dirección de laminado. La muestra F1 fue instrumentada con tres cinturones de extensómetros, cada uno conformado por cinco, colocados como se muestra en la figura 3

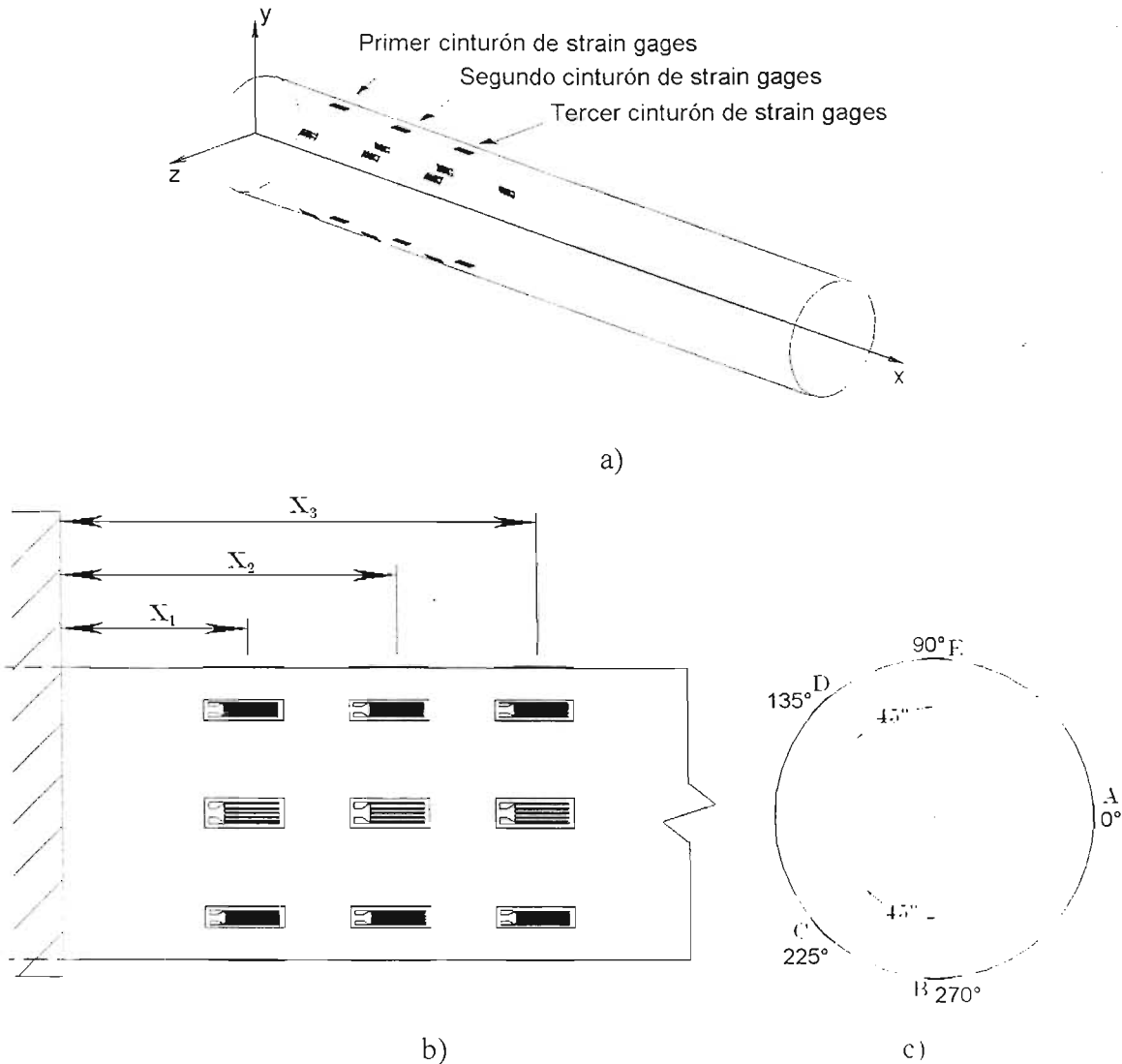


Figura 3. a) Barra prismática instrumentada F1 b) Sección longitudinal, ubicación de los cinturones de extensómetros b) Sección transversal, ubicación de los extensómetros alrededor de la barra.

Las muestras F2, F3 y F4 se instrumentaron con cuatro extensómetros cada una, dos en la parte superior y dos en la parte inferior con el fin de observar el comportamiento en tensión y compresión Fig. 4.



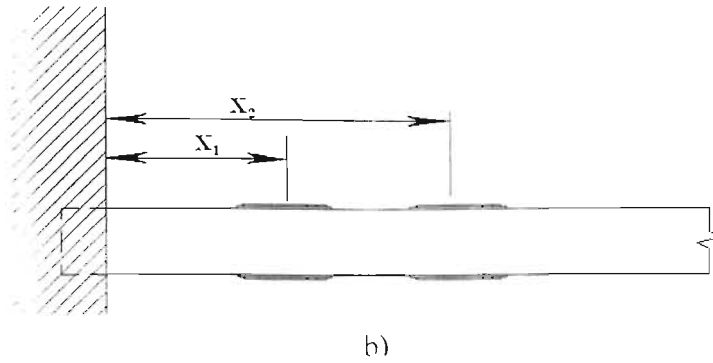


Figura 4. a) Viga instrumentada (F2, F3, F4) b) Ubicación de los extensómetros en la parte superior e inferior de la viga sobre la sección longitudinal.

La tabla 3 muestra las dimensiones de las muestras así como también ubicación de cada uno de los extensómetros colocados.

Tabla 2-. Dimensiones de las muestras

	b (m)	h (m)	d (m)	l (m)	x1 (m)	x2 (m)	x3 (m)
F1			0.013	.0964	0.005	0.0122	.0216
F2,F3,F4	0.00795	0.00168		0.0246	0.00378	.0123	

b (m), h(m) = ancho y altura, respectivamente, de la sección transversal de las vigas (F2,F3,F4) en metros.

d (m) = diámetro de la sección transversal de la barra prismática.

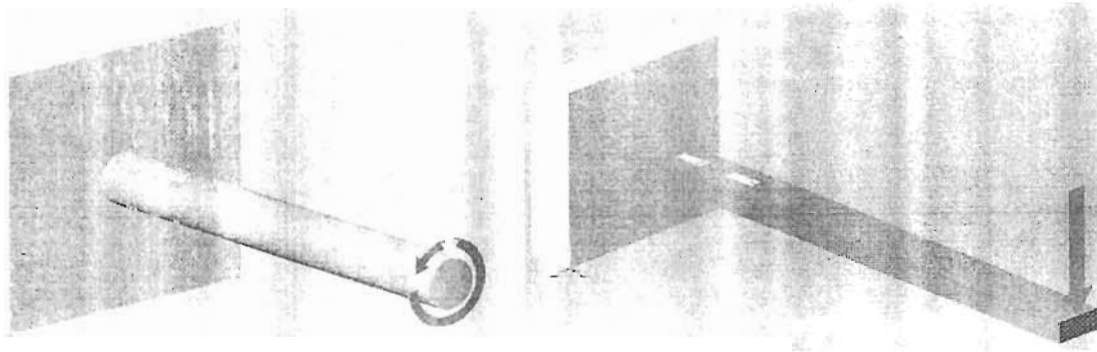
l (m) = longitud total de las muestras

x1,x2,x3 = distancias que van desde el empotramiento hasta la ubicación de los cinturones de extensómetros, en el caso de la barra prismática, y hasta la ubicación de los extensómetros que se encuentran en la parte inferior y superior de las vigas.

PRUEBAS DE CARGA

Las vigas (F2,F3,F4) fueron flexionadas aplicando una carga puntual en su extremo libre fig. 5-b, dicha carga puntual fue incrementándose paulatinamente hasta alcanzar un valor crítico, el fin de esta prueba fue observar el comportamiento de carga-deformación para cada una de las muestras, que como se mencionó anteriormente tienen diferente orientación con respecto a la dirección de laminado, también es posible observar el comportamiento en tensión, por los extensómetros que se encuentran en la parte superior de la viga, y el comportamiento en compresión por los extensómetros que se encuentran en la parte inferior. El monitoreo de las deformaciones se realizó con el equipo modelo P-3500 el cual a su vez fue conectado al multiplexor modelo SB-10, debido a que el primero solo cuenta con un canal para conectar una galga en cuarto de puente, mientras que el multiplexor cuenta con diez canales para esto.

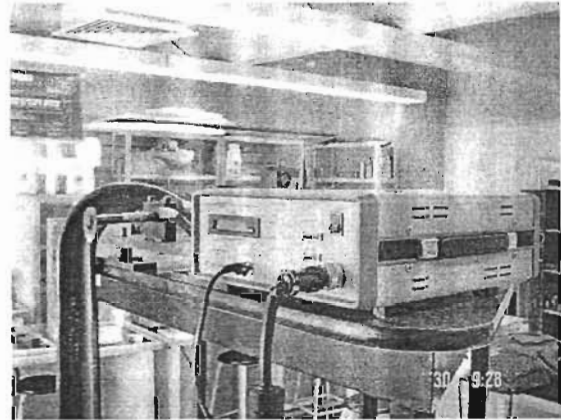
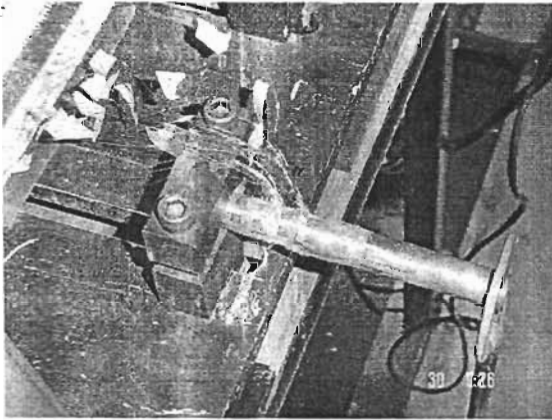
La barra prismática fue sometida a flexión y posteriormente a flexión-torsión fig 5-a, los extensómetros se colocaron en puntos donde el estado de esfuerzos es de: tensión/compresión, tensión/compresión-cortante y cortante simple. El objetivo de esta prueba fue determinar la forma de la superficie inicial de transformación en el plano de esfuerzos principales σ_1 - σ_2 ; las deformaciones fueron medidas con el sistema de adquisición de datos VISIAY 6200 fig.6.



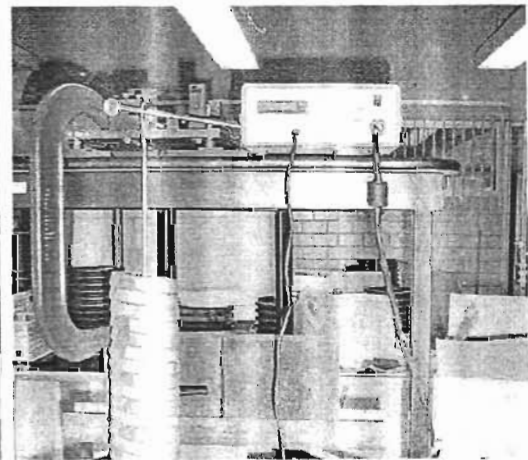
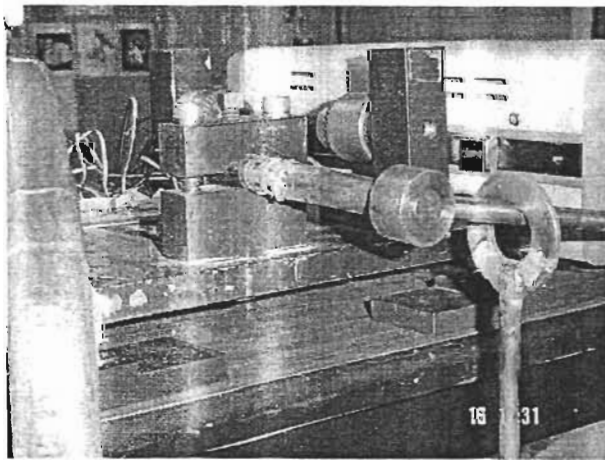
a)

b)

Figura 5. a) barra instrumentada sujeta a flexión y flexión - torsión. b) viga instrumentada sujeta a flexión.



a)



b)

Figura 6. Monitoreo de las deformaciones con el sistema de adquisición de datos VISHAY 6200 a) prueba de flexión b) prueba de flexión-torsión

El esfuerzo normal, σ , y el esfuerzo de corte, τ , fueron evaluados, respectivamente, para la prueba de flexión como:

$$\sigma_x = \frac{F(l - x_i)y_i}{I} \quad \tau_{xy} = \frac{VQ}{It} \quad (1)$$

Donde Q y I representan el primer y segundo momento de área respectivamente, F y V representan la fuerza aplicada y (x_i, y_i) definen la posición del extensómetro.

Para los extensómetros C y D, "Q" se calculó de la siguiente forma:

$$Q = \int_{y_i}^r y (r^2 - y^2) dy = y_m A \quad (2)$$

$$y_m = \frac{2}{\pi r^2} \int_0^{2r} y (r^2 - (y - r)^2) dy$$

Donde A es el área sombreada de la sección transversal de la barra Fig. 7

$$A = \int (r^2 - z^2) dz - 2y_i z_0$$

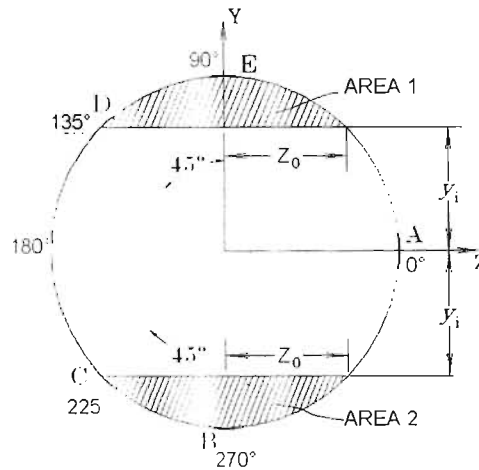


Figura 7. Parámetros utilizados para calcular el primer momento de área de la sección transversal de la barra.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

RESPUESTA MECÁNICA EN FUNCIÓN DE LA DIRECCIÓN

La figura 8 muestra las curvas carga-microdeformación correspondientes al primer extensómetro (x1) para cada una de las vigas (F2, F3 y F4), las cuales presentan el efecto superelástico característico de los MMF. Además, la tabla 3 muestra los valores de carga crítica (donde comienza el cambio de pendiente) la cual, puede notarse, es casi la misma.

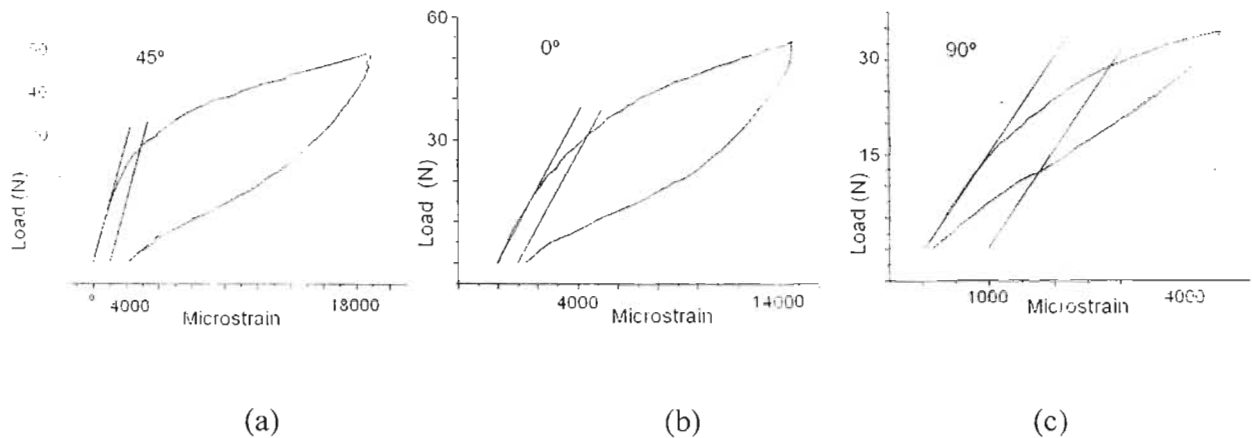


Figure 8 Lazo superelástico de las vigas (F2, F3, F4) sujetas a flexión. comportamiento en tensión a) viga F3; b) viga F2; c) viga F4.

Tabla 3. Cargas críticas

	Viga orientada a 0° F2	Viga orientada a 45° F3	Viga orientada a 90° F4
Tensión	31 (N)	27 (N)	29 (N)
Compresión	33 (N)	27 (N)	29 (N)

ESTADO DE ESFUERZO DIVERSO

PRUEBA DE FLEXIÓN

La Figura 9-a muestra el comportamiento carga-microdeformación correspondiente a cada extensómetro colocado en el primer cinturón de la barra F1 durante la prueba de flexión. La figura 9-b muestra el comportamiento correspondiente al segundo cinturón durante la misma prueba. Como se puede ver en todos los casos se aprecia el laso de superelasticidad típico de los MMF, así mismo se aprecian diferentes inclinaciones en las curvas las cuales se deben a la posición de cada extensómetro en la muestra la cual se indica en la Figura 3.

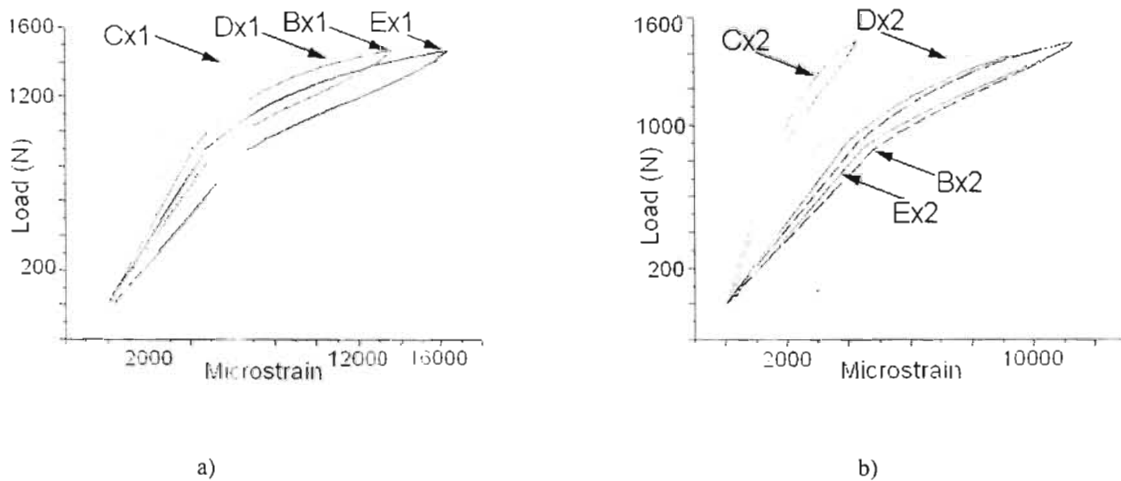


Figura 9. Curvas carga-microdeformación del primer y segundo cinturón de strain gages, x1,x2, respectivamente de la barra; a) curvas pseudoelásticas de cada strain gage correspondientes al primer cinturón, x1; b) a) curvas pseudoelásticas de cada strain gage correspondientes al segundo cinturón, x2.

Por otro lado, en la tabla 4 se muestra las cargas críticas que se aplicaron para inducir la transformación martensítica en cada extensómetro. Con dichas cargas, fueron calculados: el esfuerzo normal y el esfuerzo de corte así como los esfuerzos principales y efectivo de Mises. Es claro en la tabla 4 que, tanto en los extensómetros del primero y segundo cinturón, la transformación inicia en el punto E y continua en los puntos D, B y C respectivamente. Este comportamiento corresponde con la asimetría de la transformación reportada en la literatura sin embargo en el presente estudio se presentaron otros aspectos no esperados.

Tabla 4. Valores críticos de carga y esfuerzo correspondientes al primer y segundo cinturón de extensómetros en la barra.

1er cinturón de extensómetros	Carga crítica (N)	Esfuerzo Normal (MPa)	Esfuerzo cortante (MPa)	Esfuerzos principales (MPa)	Esfuerzo efectivo (MPa)	σ τ
Bx1	1110	461	0	$\sigma_1=0$ $\sigma_2=-461$	461	∞
Cx1	1223	367	6.15	$\sigma_1=0.103$ $\sigma_2=-367$	367	60
Dx1	1082	325	5.4	$\sigma_1=325$ $\sigma_2=0.090$	325	60
Ex1	1051	446	0	$\sigma_1=446$ $\sigma_2=0$	446	∞
2o cinturón de extensómetros	Carga crítica (N)	Esfuerzo Normal (MPa)	Esfuerzo cortante (MPa)	Esfuerzos principales (MPa)	Esfuerzo efectivo (MPa)	σ τ
Bx2	1148	449	0	$\sigma_1=0$ $\sigma_2=-449$	449	∞
Cx2	1385	383	6.96	$\sigma_1=0.126$ $\sigma_2=-383$	383	55
Dx2	1133	313	5.7	$\sigma_1=313$ $\sigma_2=-0.104$	313	55
Ex2	1133	443	0	$\sigma_1=443$ $\sigma_2=0$	443	∞

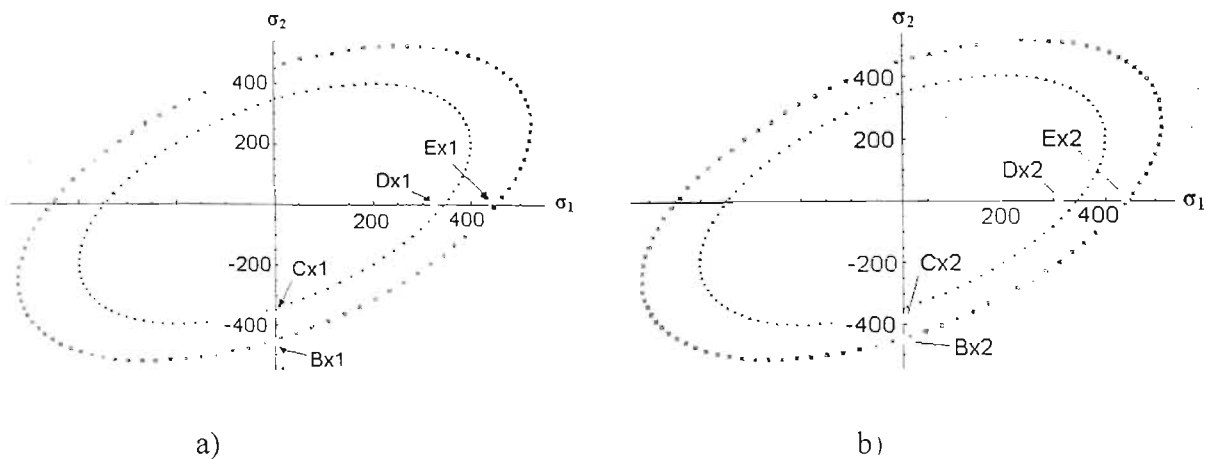


Figura 10. Plano $\sigma_1 - \sigma_2$ para la prueba de flexión a) primer cinturón de extensómetros: b) segundo cinturón de extensómetros

En la figura 10-a se presentan graficados, en un plano $\sigma_1 - \sigma_2$, los esfuerzos principales calculados para los puntos Bx1, Cx1, Dx1, Ex1 los cuales corresponden al primer cinturón de extensómetros colocados en la muestra. Así mismo, en la figura 10-b se presenta una gráfica similar correspondiente a los extensómetros colocados en el segundo cinturón de la muestra. Como se puede ver, los puntos obtenidos en el experimento se encuentran lejos de pertenecer a una curva cerrada como las que se reportan en la literatura para la transformación inducida por esfuerzos en MMF [9].

Para facilitar la interpretación de los resultados obtenidos en esta parte del estudio, fueron graficadas dos elipses que corresponden con el lugar geométrico del criterio de Von-Mises para dos esfuerzos efectivos diferentes los cuales fueron obtenidos calculando el promedio de los esfuerzos efectivos correspondientes con los puntos: Exi y Bxi así como Cxi y Dxi. La razón de esto fue debido a que en la tabla 4 se aprecia claramente que los valores de esfuerzo efectivo calculados para cada punto se aproximan entre sí para el caso de los puntos Bxi y Bxi, pero difieren de los otros dos es decir Cxi y Dxi. Es claro en las Figura 10 (a) y (b) que los puntos parecen seguir dos criterios de transformación diferentes lo cual no ha sido reportado en los estudios realizados sobre MMF. Como se mostrará posteriormente, este comportamiento persiste en las pruebas de flexión-torsión sin embargo parece disminuir ligeramente.

PRUEBA DE FLEXIÓN-TORSIÓN

Los resultados obtenidos en esta parte del estudio se presentan en las tablas 5 y 6 correspondientes a las pruebas realizadas a la muestra F1 en un arreglo de carga tipo: flexión-torsión en las cuales se varió el brazo de palanca. Como en el caso de las pruebas de flexión se calcularon, para cada caso y para cada cinturón de extensómetros, los esfuerzos normales y de corte así como los esfuerzos principales y efectivos de Mises. Así mismo, en las Figuras 11 y 12 se graficaron, en un plano $\sigma_1 - \sigma_2$, los esfuerzos principales correspondientes a los puntos de un mismo cinturón de extensómetros y en las mismas gráficas se muestran las dos elipses correspondientes al lugar geométrico del criterio de Von-Mises que a su vez corresponden a los valores de esfuerzo efectivo promedio de los puntos Exi - Bxi y Cxi - Dxi, respectivamente.

Claramente se aprecia en las tablas 5 y 6 que la transformación inicia en los puntos Exi y continúa en Dxi, Bxi y Cxi sucesivamente lo cual, sucedió también en el caso de la prueba de flexión. Así mismo, en las gráficas de las Figuras 11 y 12 nuevamente se

aprecia el comportamiento encontrado en las pruebas de flexión; los puntos correspondientes a un mismo cinturón de extensómetros no siguen un patrón único de transformación, más bien parecen estar presentes dos diferentes lo cual se aprecia claramente observando la separación entre las dos elipses. No obstante, en ésta serie de pruebas se aprecia que los puntos correspondientes a los extensómetros Bxi y Cxi tienden a aproximarse entre como si se alinearan en un solo patrón de transformación. La diferencia entre estas pruebas y las de flexión radica esencialmente en que los esfuerzos de corte son mayores y por tanto la relación σ_{τ} disminuye considerablemente. Es posible que incrementado la carga de torsión en la muestra se presente el alineamiento de todos los puntos en un único patrón de transformación. Es claro que en el presente trabajo sólo se ensayaron dos valores de torque diferentes debido a que no se esperaba encontrar dicho comportamiento sin embargo, se recomienda realizar las pruebas variando este parámetro a fin de aclarar las observaciones mencionadas.

Como se mencionó anteriormente el efecto observado en el presente trabajo, es decir la tendencia a presentar dos patrones de transformación diferentes en la misma muestra, no ha sido reportado anteriormente en la literatura sin embargo resulta de sumo interés debido a que estos arreglos de carga son más comúnmente encontrados en aplicaciones reales que los estudiados en diversos trabajos publicados. En general en los trabajos reportados se manejan modos de carga que permiten variar de manera independiente los esfuerzos de tensión y de corte aunque se estudian dos casos de carga: proporcional y no-proporcional. A pesar de que los casos presentados caen en los de esfuerzos proporcionales, los resultados no convergen con los reportados debido posiblemente a dos factores que son: cierta textura cristalina inducida por el modo de fabricación de la muestra o bien un efecto de confinamiento de los granos ya que las muestras empleadas en nuestro estudios son policristales.

Para aclarar el primer factor es preciso realizar estudios que permitan determinar la distribución de orientaciones de la muestra los cuales salen del alcance del presente trabajo, pero se recomienda realizar. El segundo factor puede ser discutido ya que en los casos estudiados, flexión y flexión-torsión, el esfuerzo efectivo necesario para iniciar la transformación martensítica es siempre mayor que el requerido para transformar el resto de la muestra. Esta afirmación se base en el hecho de que en todos los casos estudiados, en el punto Exi el esfuerzo efectivo es considerablemente mayor que para el punto Dxi, ambos puntos están ubicados en la parte superior de la muestra. Así mismo para la parte inferior, el esfuerzo efectivo es mayor para los puntos Bxi que el de los Cxi. Dicho efecto es similar al de nucleación y crecimiento observado en transformaciones de fase en estado sólido. En realidad dicho fenómeno es bien conocido en el caso de TM inducida por temperatura no ha sido reportado en el caso de TMIE. Es claro que no se cuentan con elementos suficientes para atribuir los resultados obtenidos al efecto de nucleación y crecimiento sin embargo es una explicación razonable que puede verificarse de manera relativamente simple.

Tabla 5. Valores críticos de carga y esfuerzo correspondientes al primer y segundo cinturón de extensómetros de la barra, considerando un brazo de palanca de 0.02625 m.

1^{er} cinturón de extensómetros	Carga crítica (N)	Esfuerzo Normal (MPa)	Esfuerzo cortante (MPa)	Esfuerzos principales (MPa)	Esfuerzo efectivo (MPa)	σ τ
Bx1	1144	-466	69	$\sigma_1=10$ $\sigma_2=-476$	481	6.75
Cx1	1258	-362	82	$\sigma_1=18$ $\sigma_2=-380$	389	4.4
Dx1	1128	325	74	$\sigma_1=341$ $\sigma_2=-16$	349	4.4
Ex1	1079	439	65	$\sigma_1=449$ $\sigma_2=-10$	453	6.75
2o cinturón de extensómetros	Carga crítica (N)	Esfuerzo Normal (MPa)	Esfuerzo cortante (MPa)	Esfuerzos principales (MPa)	Esfuerzo efectivo (MPa)	σ τ
Bx2	1194	-438	72	$\sigma_1=11$ $\sigma_2=-449$	455	6.1
Cx2	1408	-365	92.5	$\sigma_1=22$ $\sigma_2=-387$	399	3.95
Dx2	1171	304	77	$\sigma_1=322$ $\sigma_2=-18$	332	3.95
Ex2	1176	431	71	$\sigma_1=442$ $\sigma_2=-11$	448	6.1

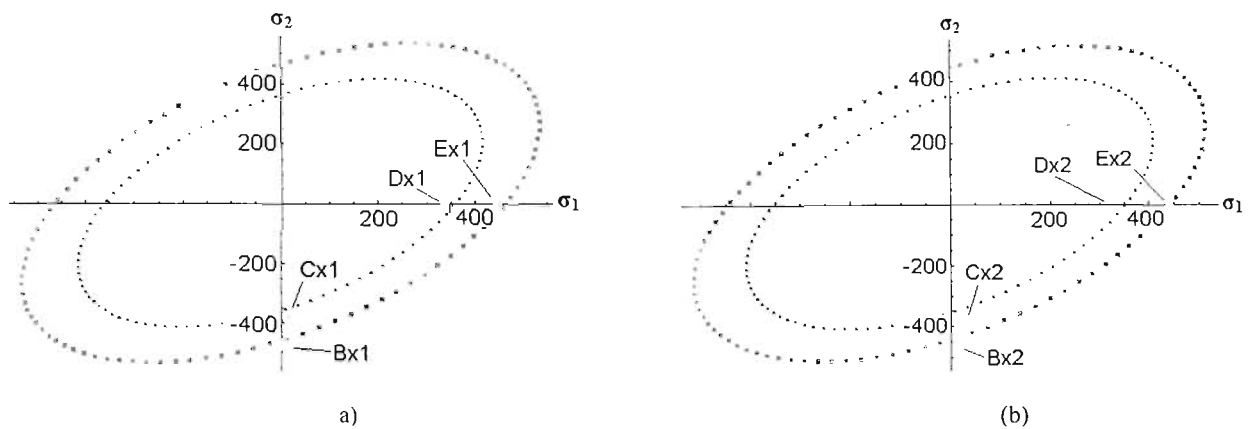


Figura 11. Plano $\sigma_1 - \sigma_2$ para la prueba de flexión-torsión, brazo de palanca menor a) primer cinturón de extensómetros; b) segundo cinturón de extensómetros

Tabla 6. Valores críticos de carga y esfuerzo correspondientes al primer y segundo cinturón de extensómetros de la barra, considerando un brazo de palanca de 0.0377 m.

1 ^{er} cinturón de extensómetros	Carga crítica (N)	Esfuerzo Normal (MPa)	Esfuerzo cortante (MPa)	Esfuerzos principales (MPa)	Esfuerzo efectivo (MPa)	σ τ
Bx1	1082.15	-440	94	$\sigma_1 = 19$ $\sigma_2 = -459$	469	4.7
Cx1	1185.2	-341	109.6	$\sigma_1 = 373$ $\sigma_2 = -32$	390	3.11
Dx1	1080.72	311	100	$\sigma_1 = 340$ $\sigma_2 = -29$	356	3.11
Ex1	1034.93	421	90	$\sigma_1 = 439$ $\sigma_2 = -18$	449	4.7
2o cinturón de extensómetros	Carga crítica (N)	Esfuerzo Normal (MPa)	Esfuerzo cortante (MPa)	Esfuerzos principales (MPa)	Esfuerzo efectivo (MPa)	σ τ
Bx2	1125	-413	103	$\sigma_1 = 24$ $\sigma_2 = -437$	450	4
Cx2	1308	-339	120.6	$\sigma_1 = 38$ $\sigma_2 = -377$	398	2.8
Dx2	1110.7	238	102.4	$\sigma_1 = 321$ $\sigma_2 = -33$	338	2.8
Ex2	1108	417	97	$\sigma_1 = 429$ $\sigma_2 = -22$	440	4

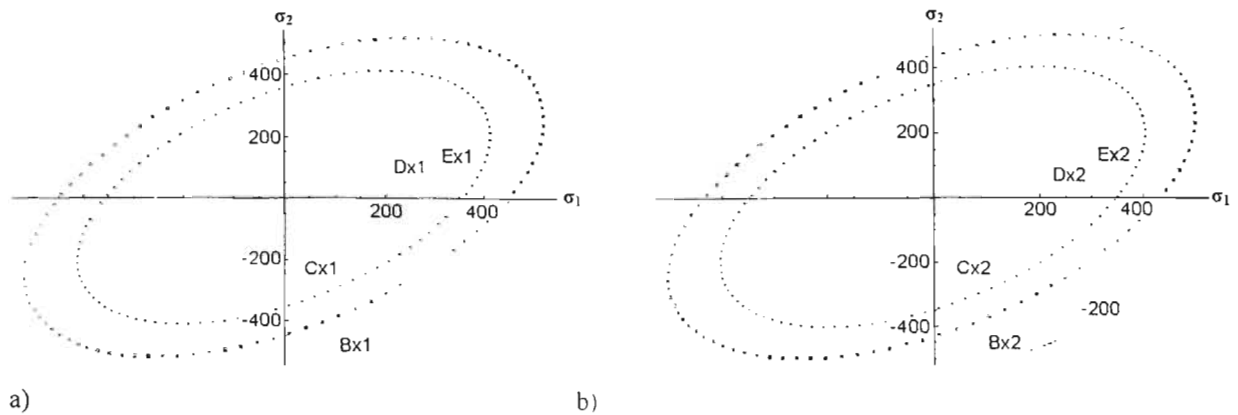


Figura 12. Plano $\sigma_1 - \sigma_2$ para la prueba de flexión-torsión. brazo de palanca mayor a) primer cinturón de extensómetros; b) segundo cinturón de extensómetros.

CONCLUSIONES

- Las vigas con diferente orientación de laminado no presentan una diferencia apreciable en su comportamiento debido a que posiblemente no se indujo en las muestras textura durante la laminación.
- En los caso de flexión y flexión-torsión se observó un comportamiento que parece indicar que en la misma muestra se presentan dos patrones de transformación diferentes. Dicho comportamiento no ha sido reportado anteriormente en la literatura.
- El efecto mencionado en el inciso anterior, tiende a disminuir cuando la carga de torsión incrementa y en consecuencia la relación σ_τ disminuye.
- Aunque se en los casos de flexión y flexión-torsión se pudo apreciar el efecto de asimetría entre los comportamiento en tensión y compresión estos resultaron considerablemente menores a los resultados reportados en la literatura.

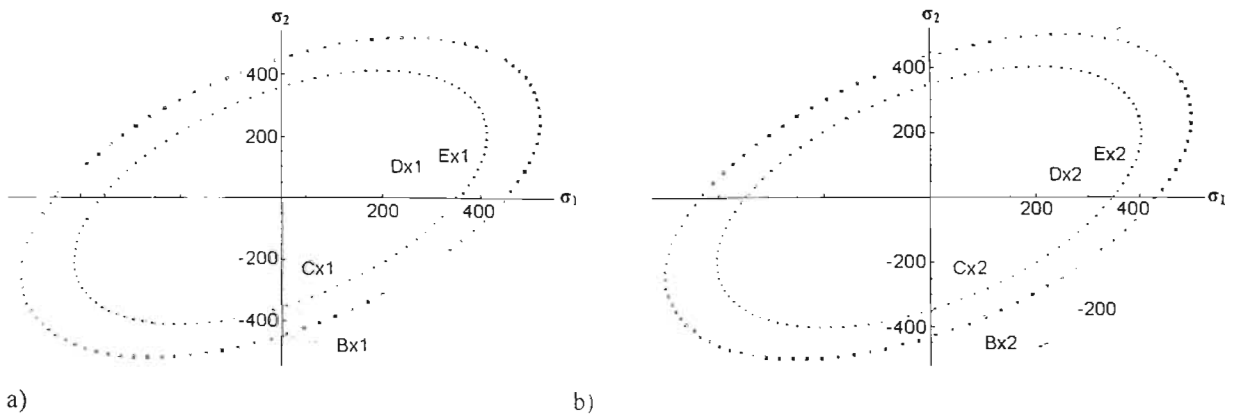


Figura 12. Plano $\sigma_1 - \sigma_2$ para la prueba de flexión-torsión, brazo de palanca mayor a) primer cinturón de extensómetros; b) segundo cinturón de extensómetros.

CONCLUSIONES

- Las vigas con diferente orientación de laminado no presentan una diferencia apreciable en su comportamiento debido a que posiblemente no se indujo en las muestras textura durante la laminación.
- En los caso de flexión y flexión-torsión se observó un comportamiento que parece indicar que en la misma muestra se presentan dos patrones de transformación diferentes. Dicho comportamiento no ha sido reportado anteriormente en la literatura.
- El efecto mencionado en el inciso anterior, tiende a disminuir cuando la carga de torsión incrementa y en consecuencia la relación $\frac{\sigma}{\tau}$ disminuye.
- Aunque se en los casos de flexión y flexión-torsión se pudo apreciar el efecto de asimetría entre los comportamiento en tensión y compresión estos resultaron considerablemente menores a los resultados reportados en la literatura.

REFERENCIAS

- 1 K. Otsuka and C. M. Wayman.. Camb. Univ Press. Pp.1-27(1998).
- 2 K. Bhattacharya and R. V. Kohn. Symmetry. Acta Mater. **44-2**, pp. 529-542 (1996)
- 3 W. M. Huang and J. J. Zhu. Mech.of Mats. **34**, pp. 547-561(2002).
- 4 P. Sittner, Y. Hara and M. Tokuda. Met. and Mats Tans A. **34A**, pp. 2923-2935 (1995).
- 5 P. Sittner, K. Hashimoto, M. Kato and M. Tokuda. Scrip. Mat. **48**, pp. 1153-1159. (2003).
- 6 M. Somerday, R. J. Comstock, JR. And J. A. Wert. Effect of Grain Size on the Observed Pseudoelastic Behavior of a Cu-Zn-Al Shape Memory Alloy. Metall and Mat Trans A. **28A**. pp. 2335-2341(1997).
- 7 S. S. Leu, Y. C. Chen, R. D. Jean. Journal of Mater Sci. **27**.pp 2792-2798. (1992).
- 8 K. Gasll. H. Sehitoglu, H. J. Maier and K. Jacobus. Metall and Mat Trans A. **29A**, pp. 765-773 (1998).
- 9 C. Bouvet, S. Calloch and . C. LExcellent. Machanical Behavior of a Cu-Al-Be Shape Memory Alloy under multiaxial proportional and nonproportional loadings. Journal of Engineering Material and Technology. **124** , pp. 112-123(2002).
- 10 J. Cortés P., J. Jiménez G., J. A. Gutiérrez M., F. M. Sánchez A., H. Flores Z. Mem V Congr Soci Mex de Ing Mec. México. pp. 154-161 (1999).
- 11 K. Otsuka and C. M. Wayman. Camb Univ Press. Pp.27-97(1998).
- 12 T. E. Buchheit and J. A. Wert.. Met and Mats Trans A. **25A**. pp. 2383-2389(1994).
- 13 T. E. Buchheit, S. L. Kumpf and J. A. Wert. Acta metall. mater.**43-11**. pp. 4189-4199 (1995).
- 14 R. J. Comstock, T. E. Buchheit, M. Somerday and J. A. Wert. Acta Mater. **44-9**, pp. 3505-3514(1996).
- 15 E. Patoor, M. El Amrani, A Eberhardt and M. Berveiller. *Proce of de III Eur Symp on Martensitic Transf* BARCELONA, SPAIN: PLANES a, (ed), J de Physique Colloque C-2, p. 495. (1994).
- 16 H. Flores. Satabilité Thermodynamique de la Phase Beta et de l' effet Memoire Double sens d'un Alliage a Memoire de Forma du Type Cu-Al-Be. *Thèse de doctorat* :Ins. Nat. Sc. Appl., Lyon FRA, 1993.