

# Capítulo 4

## Desarrollo

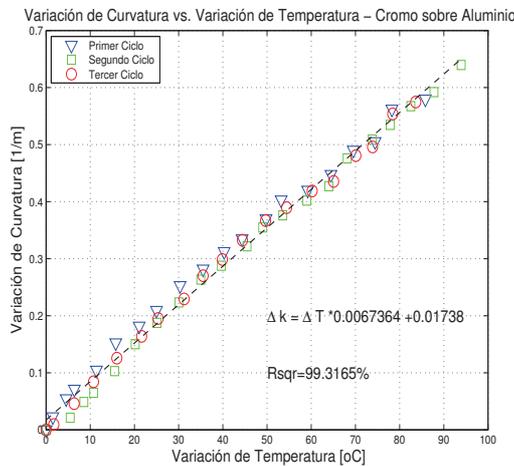
### 4.1. Verificación

Con el objetivo de verificar la validez del método de obtención de propiedades (ej. Módulo de Elasticidad) por el método de curvatura, se optó por el análisis de datos de probetas existentes y previamente analizadas en el Laboratorio de la Universidad de Stony Brook, USA. Las probetas tenían diversas composiciones:

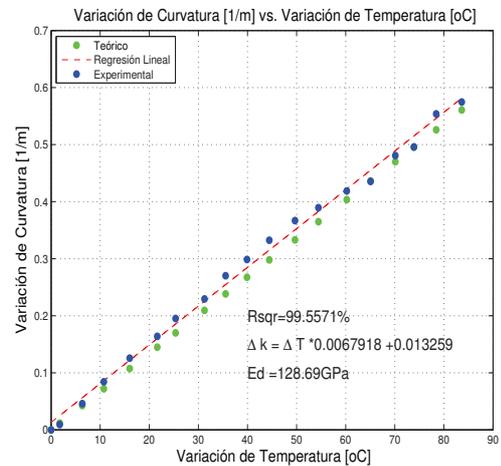
1. Placa de Recubrimiento de Cromo Duro sobre Sustrato de Aluminio
2. Placa de Recubrimiento de Cromo Duro sobre Sustrato de Acero
3. Placa de Recubrimiento de Carburo de Tungsteno sobre Sustrato Acero Inoxidable SS316.

Se hizo un análisis de tres ciclos de calentamiento y enfriamiento y se obtuvieron los perfiles de la pieza a diversas temperaturas. Utilizando el método de extracción de la curvatura explicado en la sección 2.2, Capítulo II, se obtuvieron las curvaturas de las probetas en función de la temperatura. Los resultados para las diversas probetas se muestran a continuación:

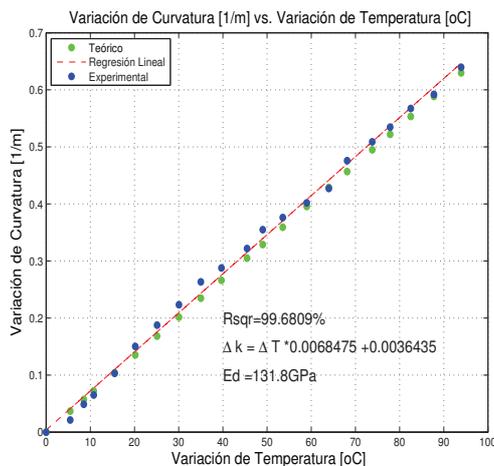
### 4.1.1. Placa de Recubrimiento de Cromo sobre Sustrato de Aluminio



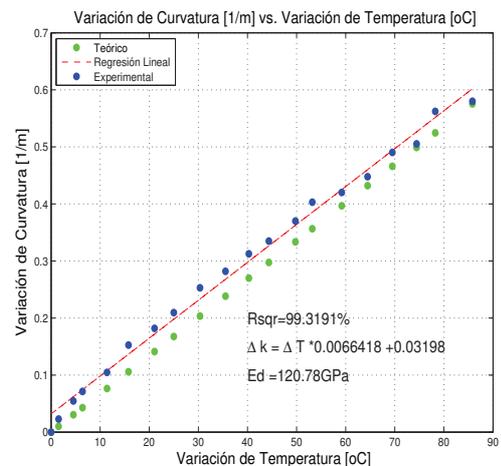
Curvatura vs. Temperatura (3 Ciclos)



Curvatura vs. Temperatura (Primer Ciclo)



Curvatura vs. Temperatura (Segundo Ciclo)



Curvatura vs. Temperatura (Tercer Ciclo)

Figura 4.1: Resultados de la medición de la P-1D de Recubrimiento de Cromo Duro sobre Sustrato de Aluminio.

Como se puede observar en la Figura 4.1, los tres ciclos muestran comportamientos lineales muy semejantes con una linealidad que alcanza un valor mínimo de 99,31 % . Además, se muestran los valores estimados de módulo de Young. No se poseían valores conocidos provistos por otro laboratorio como punto de comparación de esta probeta por lo que no se pudo corroborar la validez del valor del

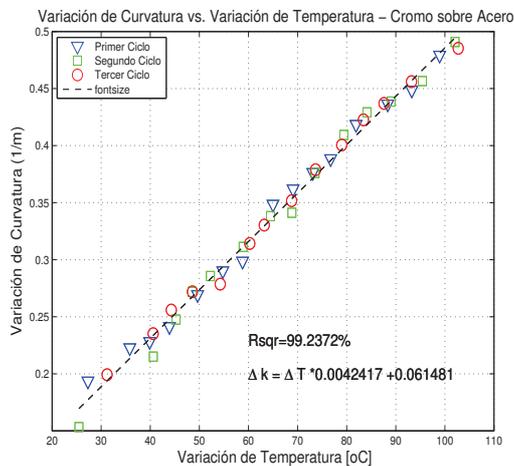
módulo de Young obtenido por el sistema. Sin embargo, el objetivo del análisis de esta placa -así como de la placa de cromo duro sobre Acero- era el confirmar la linealidad y repetibilidad de los resultados. Se puede ver que el resultado es bastante satisfactorio, las curvas curvatura vs. temperatura muestran alta linealidad y repetibilidad. Esto se deduce a partir del valor de la media de los módulos de Young:  $127 \pm 5,6GPa$ . Cabe recalcar que el recubrimiento no presentaba una distribución del todo uniforme por lo que ésto pudo incrementar el error Y la desviación estándar. Por otro lado, el valor del módulo de Young encontrado se aproxima bastante a la mitad del valor del *bulk* definido en la Tabla 4.1.

Propiedades de la placa	
Módulo de Young Sustrato <sup>+</sup> :	69GPa
Módulo de Young Depósito <sup>+</sup> :	248GPa
Coefficiente de Poisson Sustrato <sup>+</sup> :	0,3
CTE Sustrato <sup>+</sup> :	$22,2 \cdot 10^{-6}C^{-1}$
CTE Depósito <sup>+</sup> :	$6,2 \cdot 10^{-6}C^{-1}$
Espesor Sustrato	2mm
Espesor Depósito	0,5mm
Largo de la Probeta	270mm
Ancho de la Probeta	25,4mm

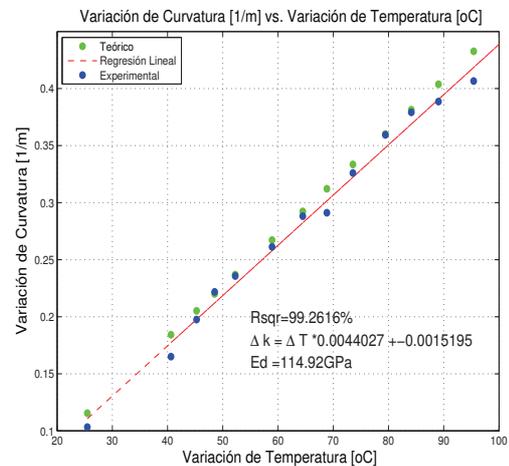
Cuadro 4.1: Propiedades de la probeta P-1D de Recubrimiento de Cromo Duro sobre Sustrato de Aluminio. <sup>+</sup> :Valores de literatura [MatWeb(2014)].

Esto es interesante porque implica que el proceso de termorociado es acorde con la tendencia general de que el termorociado reduce a un fracción de entre 0,2 y 0,5 el valor del material sin imperfecciones (*bulk*).

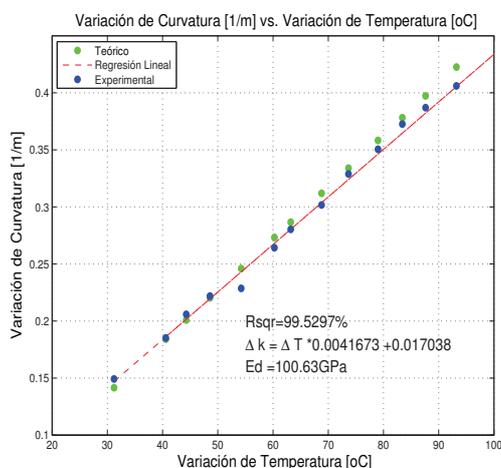
### 4.1.2. Placa de Recubrimiento de Cromo Duro sobre Sustrato de Acero



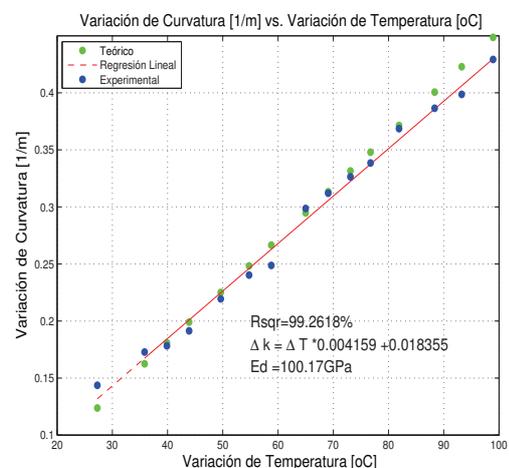
Curvatura vs. Temperatura (3 Ciclos)



Curvatura vs. Temperatura (Primer Ciclo)



Curvatura vs. Temperatura (Segundo Ciclo)



Curvatura vs. Temperatura (Tercer Ciclo)

Figura 4.2: Resultados de la medición de la P-1D de Recubrimiento de Cromo Duro sobre Sustrato de Acero.

Como se puede observar en la Figura 4.2, los tres ciclos muestran comportamientos lineales muy semejantes con una linealidad que alcanza un valor mínimo de 98,49%. Además, se muestran los valores estimados de módulo de Young. No se poseían valores conocidos producidos por otros laboratorios como punto de

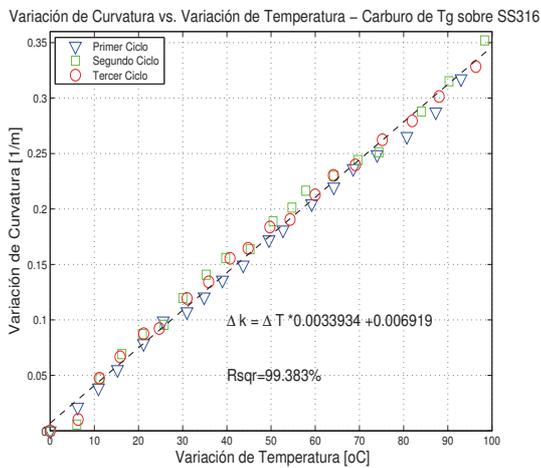
comparación de esta probeta por lo que no se pudo corroborar la validez del valor del módulo de Young obtenido por el sistema. Sin embargo, el objetivo del análisis de esta placa -así como de la placa de cromo duro sobre aluminio- era el confirmar la linealidad y repetibilidad de los resultados. Se puede ver que el resultado es bastante satisfactorio, las curvas curvatura vs. temperatura muestran alta linealidad y repetibilidad. Esto se deduce a partir del valor de la media de los módulos de Young:  $105,38 \pm 8,38 GPa$ . Por otro lado, al igual que en el caso anterior, el valor del módulo de Young encontrado se aproxima bastante al 40% del valor del *bulk* definido en la Tabla 4.2.

Propiedades del Bimetal	
Módulo de Young Sustrato <sup>+</sup> :	200GPa
Módulo de Young Depósito <sup>+</sup> :	248GPa
Coefficiente de Poisson Sustrato <sup>+</sup> :	0,3
CTE Sustrato <sup>+</sup> :	$13,6 \cdot 10^{-6} C^{-1}$
CTE Depósito <sup>+</sup> :	$6,2 \cdot 10^{-6} C^{-1}$
Espesor Sustrato	1,05mm
Espesor Depósito	0,55mm
Largo de la Probeta	270mm
Ancho de la Probeta	25,4mm

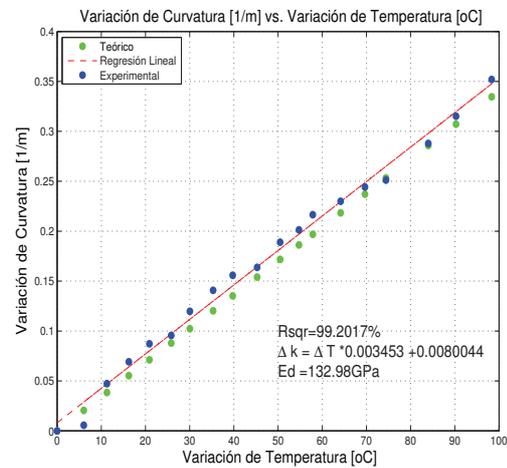
Cuadro 4.2: Propiedades de la probeta P-1D de Recubrimiento de Cromo Duro sobre Sustrato de Acero. <sup>+</sup>: Valores de literatura [MatWeb(2014)].

Esto es interesante porque implica que el proceso de termorociado es acorde con la tendencia general de que el termorociado reduce a un fracción de entre 0,2 y 0,5 el valor del material sin imperfecciones (*bulk*).

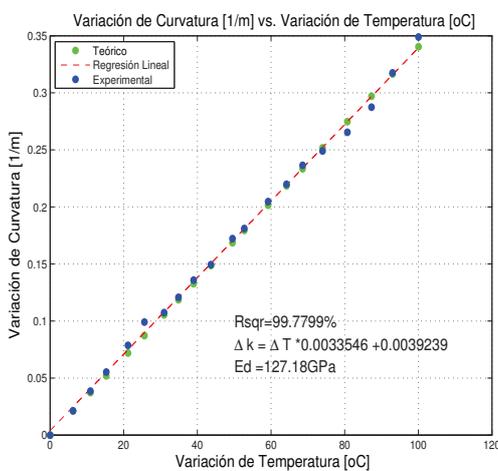
### 4.1.3. Placa de Recubrimiento de Carburo de Tungsteno sobre Sustrato de Acero Inoxidable SS316



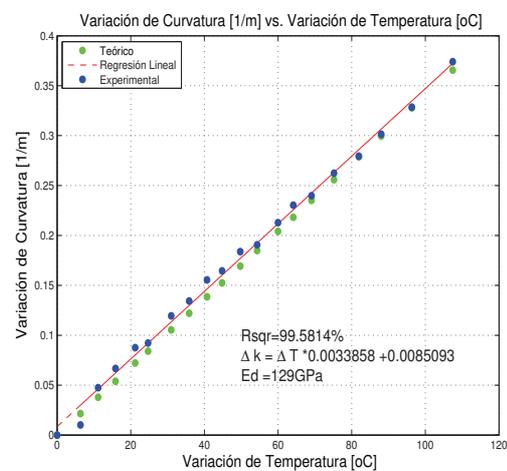
Curvatura vs. Temperatura (3 Ciclos)



Curvatura vs. Temperatura (Primer Ciclo)



Curvatura vs. Temperatura (Segundo Ciclo)



Curvatura vs. Temperatura (Tercer Ciclo)

Figura 4.3: Resultados de la medición de la placa P-1D P-1D de Recubrimiento de Carburo de Tungsteno sobre S316.

Como se puede observar en la Figura 4.3, los tres ciclos muestran comportamientos lineales muy semejantes con una linealidad que alcanza un valor mínimo de 99,7% . Las propiedades del material se presentan en la Tabla 4.3

Propiedades del Bimetal	
Módulo de Young Sustrato <sup>+</sup> :	193GPa
Módulo de Young Depósito <sup>+</sup> :	230GPa
Coefficiente de Poisson Sustrato <sup>+</sup> :	0,3
CTE Sustrato <sup>+</sup> :	$16,6 \cdot 10^{-6} C^{-1}$
CTE Depósito <sup>+</sup> :	$5,2 \cdot 10^{-6} C^{-1}$
Espesor Sustrato	1,486mm
Espesor Depósito	0,313mm
Largo de la Probeta	270mm
Ancho de la Probeta	25,4mm

Cuadro 4.3: Propiedades de la probeta P-1D de Recubrimiento de Carburo de Tungsteno sobre Sustrato de Acero Inoxidable SS316. <sup>+</sup> :Valores de literatura [MatWeb(2014)].

A diferencia de las probetas anteriores, sí se disponía de información de contraste que permitiese compara y validar el método. La probeta de Carburo de Tungsteno sobre Acero Inoxidable SS316 fue analizada en años anteriores en el Laboratorio CTSK de la Universidad Stony Brook en New York como parte de un investigación doctoral. Mediante el uso de equipos especializados y en un ambiente controlado se obtuvieron los datos de curvatura vs. temperatura. La Figura 4.4 muestra los resultados provistos por Stony Brook.

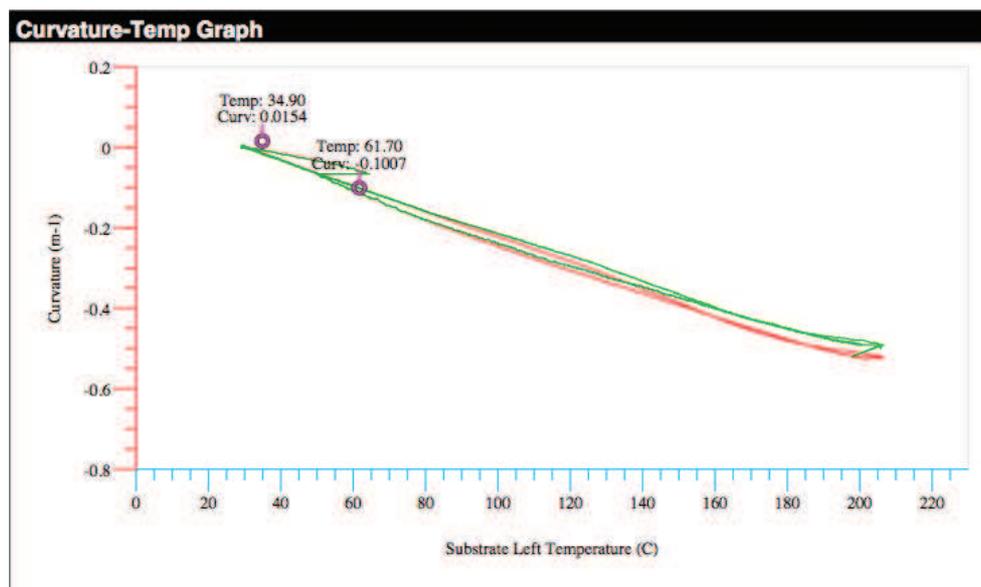


Figura 4.4: Placa de Carburo de Tungsteno sobre Acero Inoxidable SS316. Curvatura vs. Temperatura.

Los datos de curvatura vs. temperatura obtenidos por este laboratorio se cotejaron con los resultados obtenidos con la metodología local, previamente descrita, con el fin de verificar la validez del método. Para realizar una comparación adecuada, se optó por tomar el promedio linealizado de las tres ciclos curvatura-temperatura adquiridos y compararlo con el valor proveído por Stony Brook. En la Figura 4.5 se muestran las curvas obtenidas por cada uno de los métodos simultáneamente al igual que los respectivos ajustes lineales.

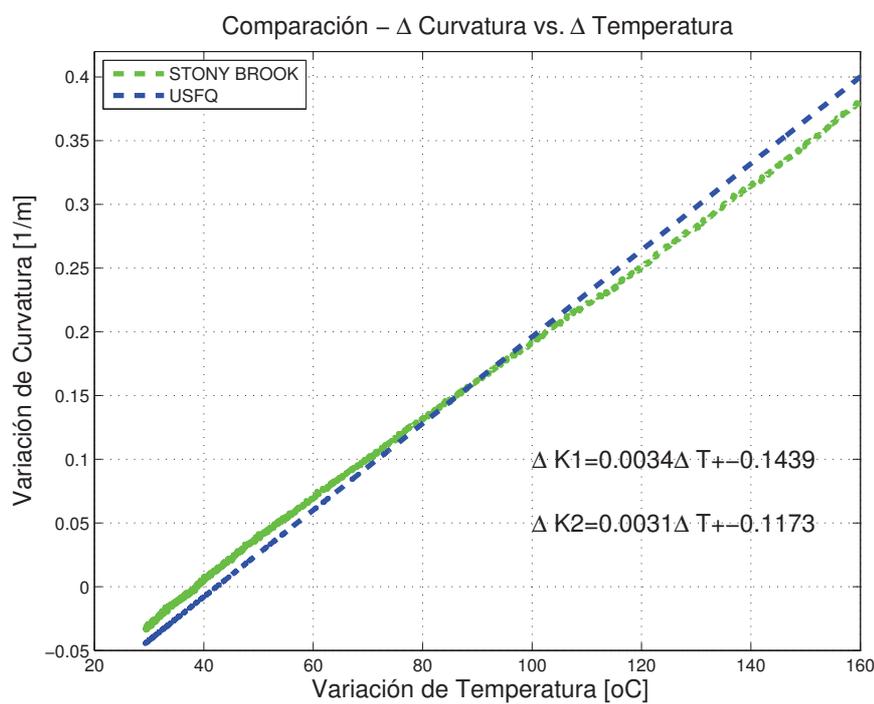


Figura 4.5: Comparación: Variación de Curvatura vs. Variación de Temperatura. Stony Brook y USFQ.

De la Figura 4.5 se puede ver la proximidad entre las curvas obtenidas bajo el método local y las curvas obtenidas en Stony Brook. El porcentaje de error es de alrededor del 8% que es un valor bastante aceptable dada la sensibilidad del proceso. La combinación de espesores y módulos de Young produce que el comportamiento Curvatura-Temperatura sea más sensible a errores en la toma de datos. Además, se tienen diversas fuentes de error como los gradientes de temperatura y el hecho de que la toma de datos no es instantánea. Es decir,

al sistema le toma un tiempo determinado realizar el escaneo de la pieza; tiempo en el que la temperatura disminuye y genera un error intrínseco en los datos. Aún así, los resultados muestran bastante cercanía y permiten tener un marco de referencia para el desarrollo de la experimentación subsiguiente. Por otro lado, se puede ver que los valores obtenidos en los diferentes ciclos se muestran en la Figura 4.3 y tienen una media de  $127,9 \pm 0,88 GPa$ . El valor del Módulo de Young obtenido en Stony Brook fue de  $130 GPa$ . Como se puede ver, los valores son muy cercanos con un error aproximado de 1,6 %.

## 4.2. Fabricación de Probetas

### 4.2.1. Conformación del Sustrato

Con el objetivo de analizar el modelo de deformación debido a esfuerzos térmicos en materiales recubiertos por termorociado, se fabricaron probetas de geometrías predeterminadas adecuadas a las necesidades de la investigación. Como material base, sustrato, se eligió Aluminio de 2 mm de espesor debido a su elevado coeficiente de expansión térmica que permitiría maximizar la deformación y por lo tanto favorecer la medición.

Con el objetivo de analizar las deformaciones tridimensionales en piezas de utilidad práctica, se utilizó como modelo un álabe de un turbocompresor marca ABB. La pieza real se muestra en la Figura 4.6::



Figura 4.6: Álabe de Turbocargador ABB.

A partir de estas piezas, se conformaron plásticamente probetas moldeadas a la misma geometría. Las piezas recreadas se muestran en la Figura 4.7:



Figura 4.7: Recreación del Álabe de Turbocargador ABB.

Del mismo modo, se produjeron muestras de diversas geometrías. La Figura 4.8 muestran los sustratos de las mismas mientras que la Tabla 4.4 define sus características.



Figura 4.8: Probetas de aluminio previo al *Thermal Spray Coating*.

Propiedad	Probeta Alargada P-1D	Probeta Cuadrada P-2D	Probeta Álabe P-3D
Número de Muestras	2	2	2
Espesor Sustrato	2mm	2mm	2mm
Espesores Depósito	0,2mm	0,3mm	0,4mm
	0,2mm	0,18mm	0,4mm
Largo de la Probeta	270mm	270mm	270mm
Ancho de la Probeta	25,4mm	25,4mm	25,4mm

Cuadro 4.4: Propiedades de las probeta P-1D de Recubrimiento de alambre 100MXC sobre Sustrato de Aluminio.

#### 4.2.2. Proceso de Termorociado

El objetivo era formar una capa de recubrimiento de material 100MXC Nanowire uniforme de entre 0.2 y 0.4 mm de espesor sobre una sola cara de las probetas. El proceso fue realizado por la empresa IMETCA Cia. Ltda. Los pasos del proceso de metalización se describen a continuación:

1. **Sand Blasting.**- En este proceso conocido como granallado en español,

se disparan partículas finas (granalla) a gran velocidad sobre las piezas. Las partículas son impulsadas por aire comprimido y al impactar sobre la superficie, éstas se encargan de limpiar todo tipo de impurezas. Además, gracias a este procedimiento, se obtiene una superficie rugosa ideal para la posterior aplicación del recubrimiento por termorociado. La Figura 4.9 muestra esta parte del proceso:

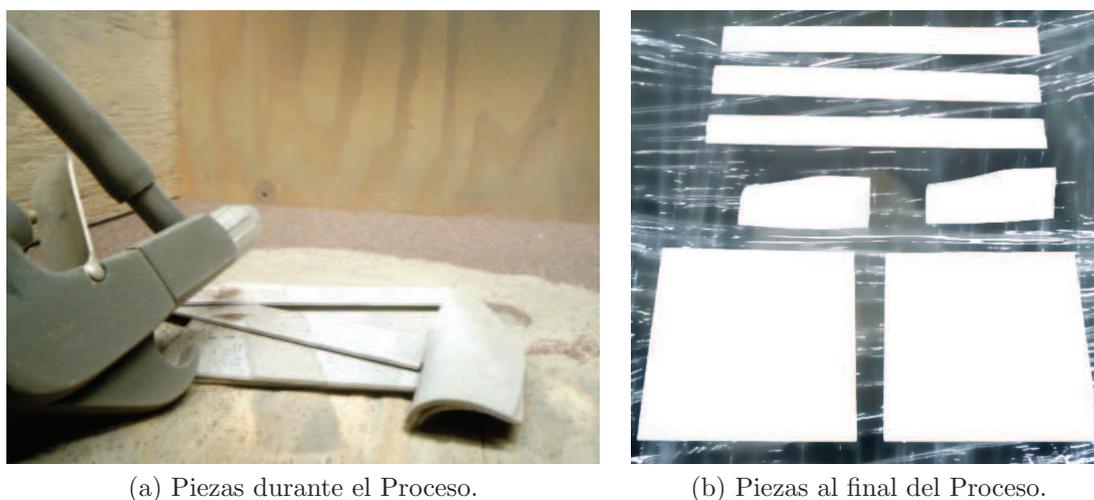


Figura 4.9: Proceso de Sand Blasting.

2. **Termorociado.-** Una vez que las piezas han pasado por el proceso de *Sand Blasting* se realiza el proceso de TR. Para ésto, se uso un material de alimentación 100MXC Nanowire marca TAFE y un equipo especializado para el proceso tipo arco (*Arc Spray*). LA Figura 4.10 muestras el material y el equipo mientras que la composición del material de aporte se muestra en la Tabla 4.5:

Material	Cr	B	Mo	Tg	Mn	Fe	Si	Nb	C
%	≤ 20	≤ 5	≤ 5	≤ 2	≤ 2	≤ 70	≤ 2	≤ 12	≤ 4

Cuadro 4.5: Composición del material de Recubrimiento de alambre 100MXC marca TAFE.



Figura 4.10: Material de Recubrimiento y Equipo de TR.

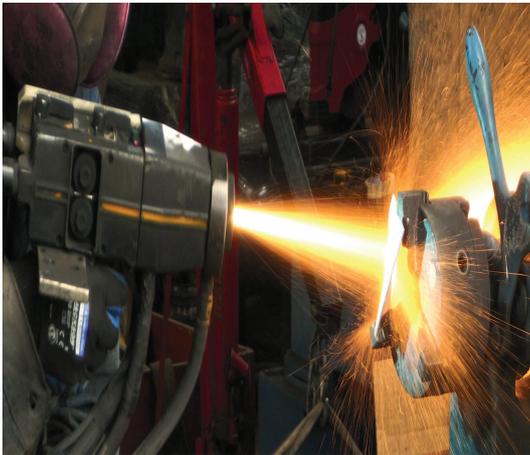
El depósito del recubrimiento se realizó en ciclos con varios segundos de pausa entre ellos. Ésto se realizó con el objetivo de no aumentar significativamente la temperatura de la probeta durante el proceso y por ende reducir los esfuerzos residuales sobre las muestras. La temperatura se controla mediante el uso de un termómetro infrarrojo simple. El proceso es manual como se observa en la Figura 4.11 que además muestra el proceso de depósito del recubrimiento para las diversas probetas. El hecho de que el proceso sea manual tiene un efecto adverso sobre la homogeneidad del espesor del recubrimiento sobre el sustrato. Aún así, la uniformidad es suficiente para llevar a cabo el estudio de deformación.



P-1D



P-3D



P-3D



P-2D

Figura 4.11: Proceso de TR sobre las diversas probetas.

Las probetas una vez finalizado el proceso, mostrada en la Figura 4.12, presentan un acabado superficial rugoso y de apariencia uniforme en toda el área.

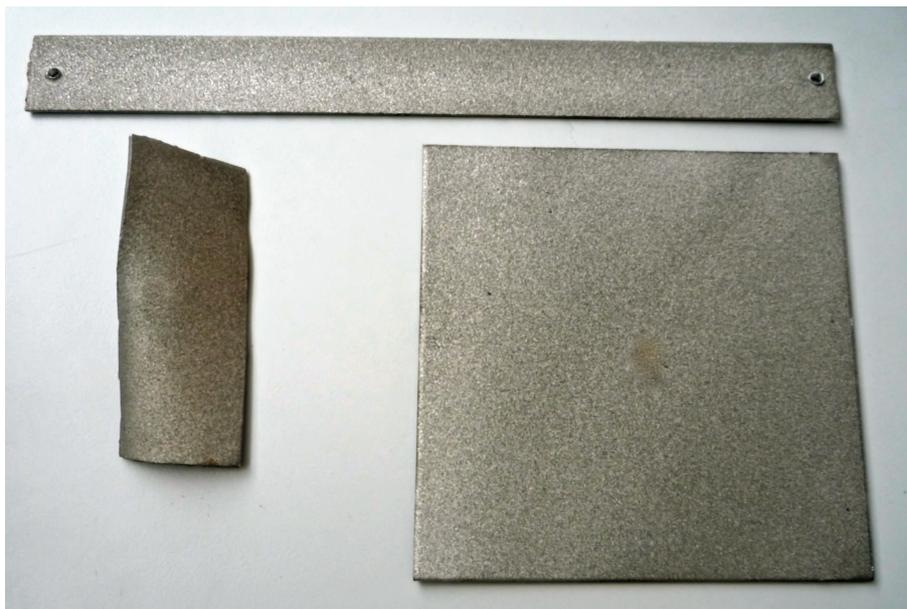


Figura 4.12: Probetas luego del proceso de TR.

### 4.3. Análisis de Probetas

#### 4.3.1. Placa Unidimensional con Recubrimiento de Alambre 100MXC sobre sustrato de Aluminio (P-1D)

El análisis Unidimensional se llevó a cabo sobre dos probetas de Aluminio con un recubrimiento de 100MXC (composición descrita en la Tabla 4.5) con las propiedades mostradas en la Tabla 4.6. Los valores de  $CTE$  fueron estimados a partir de la composición del recubrimiento.

Propiedades del Bimetal	
Módulo de Young Sustrato <sup>+</sup>	69GPa
CTE Sustrato <sup>+</sup>	$22,2 \cdot 10^{-6}C^{-1}$
CTE Depósito <sup>+</sup>	$13 \cdot 10^{-6}C^{-1}$
Espesor Sustrato	2mm
Espesor Depósito	0,2mm
Largo de la Probeta	250mm
Ancho de la Probeta	25mm

Cuadro 4.6: Propiedades de la probeta P-1D de Recubrimiento de alambre 100MXC sobre Sustrato de Aluminio. <sup>+</sup>:Valores de literatura [MatWeb(2014)].

Estas probetas fueron colocadas cuidadosamente sobre la estación de medición como se muestra en la Figura 4.13 y se tomaron datos para tres ciclos consecutivos de calentamiento/enfriamiento.

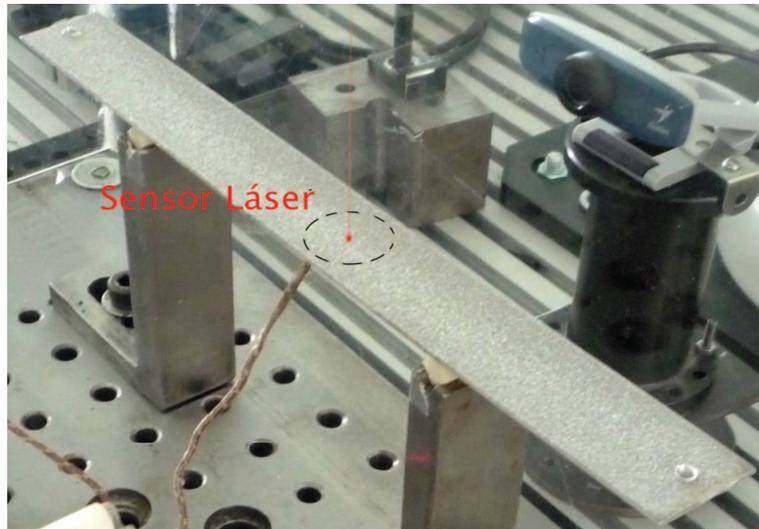
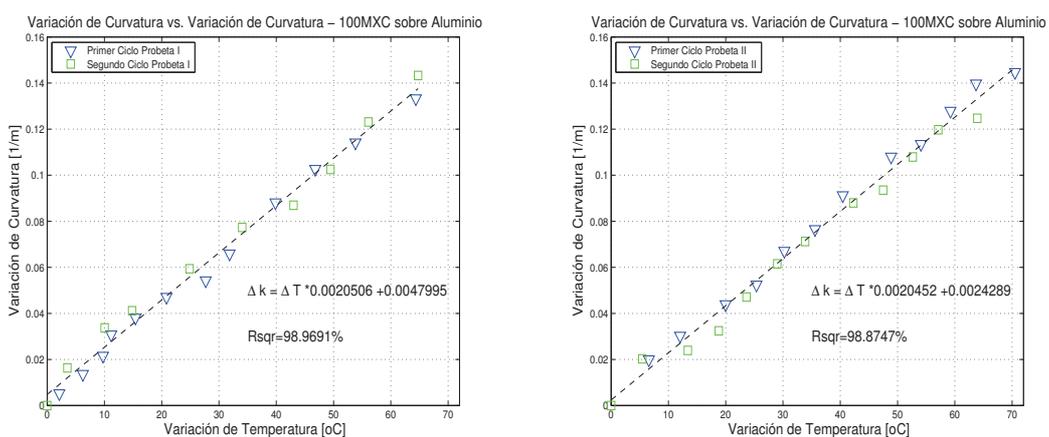


Figura 4.13: Proceso de Medición de curvatura (Placa de 100MXC sobre Aluminio).

Se utilizaron dos probetas idénticas para el análisis. La regresión lineal de los valores obtenidos y su respectivo coeficiente de regresión ( $R^2$ ) se muestran también en la Figura 4.14 para cada probeta respectivamente:

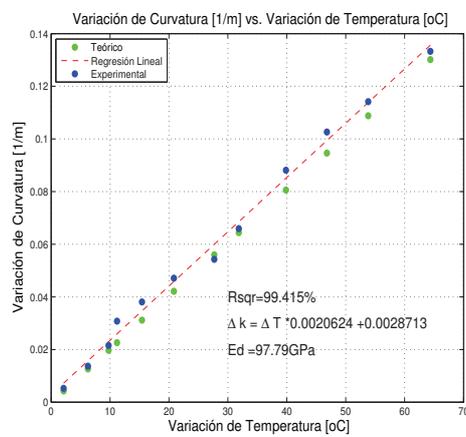


(a) Probeta I,  $\Delta$  Curvatura vs.  $\Delta$  Temperatura

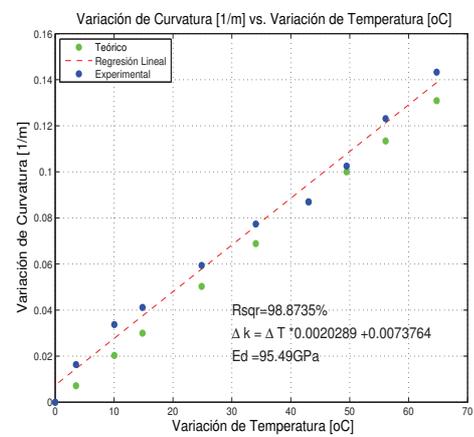
(b) Probeta II,  $\Delta$  Curvatura vs.  $\Delta$  Temperatura

Figura 4.14: Variación de Curvatura vs. Variación en Temperatura (Placa de 100MXC sobre Aluminio).

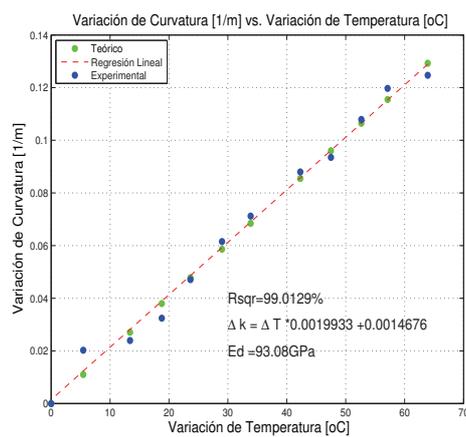
De la Figura 4.14 se puede observar la uniformidad de las mediciones. Las mediciones alcanzan una linealidad de 98,97 % y 99,69 %. Éstos valor alto permite concluir que las probetas P-1D cumplen con el comportamiento lineal teórico. Además, el tener una alta linealidad minimiza el error en el valor de módulo de Young estimado a partir de una regresión lineal. A continuación, en la Figura 4.15 se muestran por probeta y ciclo por ciclo, los resultados obtenidos (curvatura vs. temperatura y Módulo de Young):



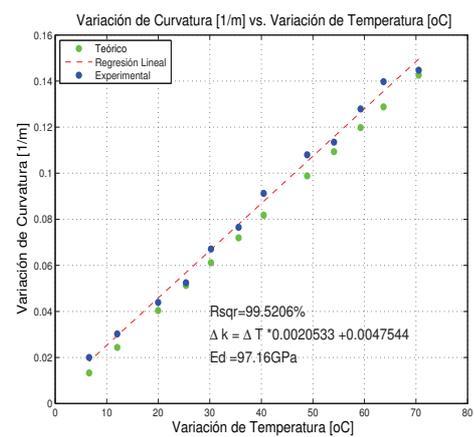
Probeta I, Ciclo I,  $\Delta$  Curvatura vs.  $\Delta$  Temperatura



Probeta I, Ciclo II,  $\Delta$  Curvatura vs.  $\Delta$  Temperatura



Probeta II, Ciclo I,  $\Delta$  Curvatura vs.  $\Delta$  Temperatura



Probeta II, Ciclo II,  $\Delta$  Curvatura vs.  $\Delta$  Temperatura

Figura 4.15: Variación de Curvatura vs. Variación en Temperatura (P-1D de 100MXC sobre Aluminio Probeta II).

De la Figura 4.15, se puede apreciar que los valores de linealidad son altos siendo el menor 98,874 %. Además, todos los valores del Módulo de Young son similares con una media de  $95,88 \pm 2,1 GPa$ . Este valor es ligeramente menor a la mitad del valor del acero A36 que es de  $200 GPa$ . Por regla general, se estima que el módulo del recubrimiento es una fracción entre 0,2 y 0,5 del módulo del Young del *bulk* (material sin defectos). A partir de esta noción, podemos decir que tener  $95,88 GPa$  de módulo de Young satisface este condicionamiento y se encuentra entre valores similares a los que se encuentran reportados. Por otro lado, con este valor de módulo de Young obtenido se pudo calcular la distribución de esfuerzos aplicando el método de Timoshenko [Chung(1990)] como se muestra en la Figura 4.16:

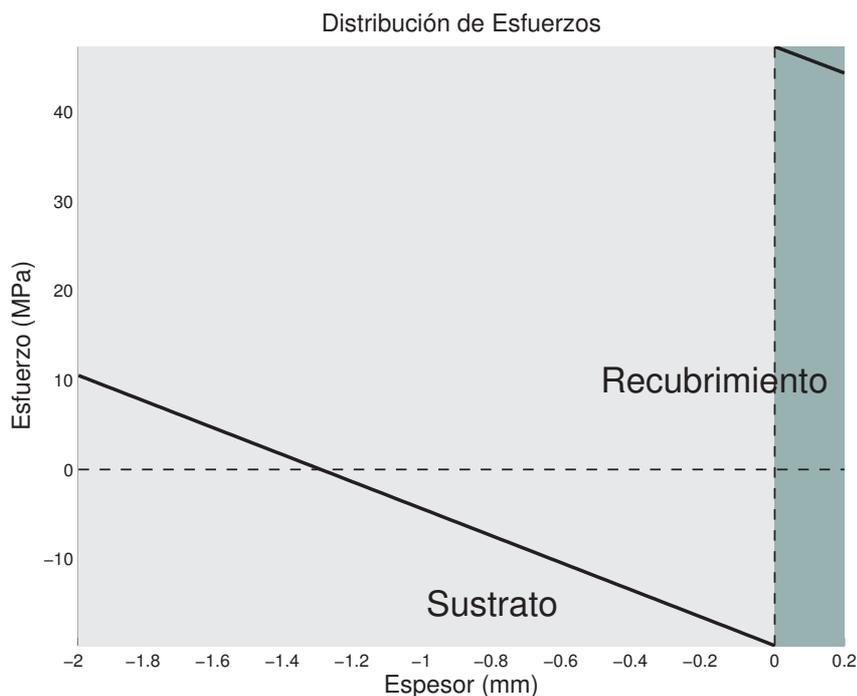
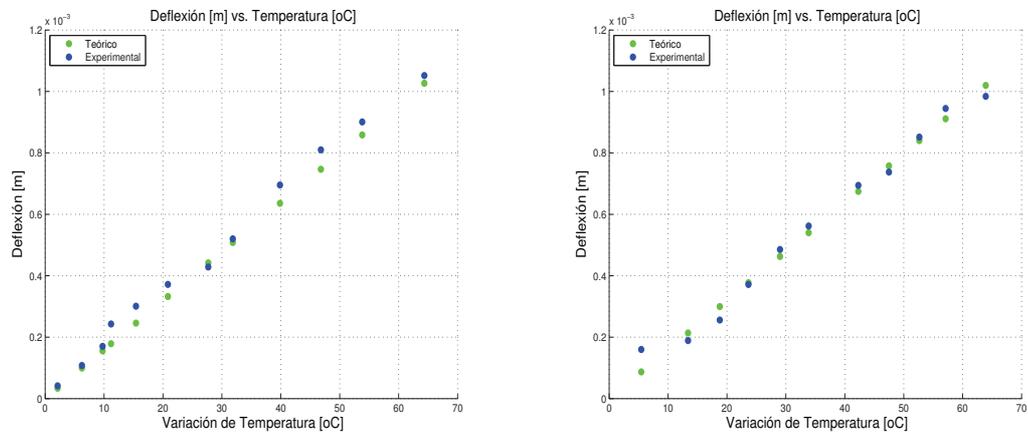


Figura 4.16: Resultado de la medición P-1D. Distribución de Esfuerzos.

Como se puede apreciar, los esfuerzos son bajos, sin superar los  $50 MPa$ . Esto garantiza que durante la adquisición de datos no se superaron nunca los esfuerzos de fluencia del material y, por ende, nunca se superó el límite elástico de los materiales. Por último, con el objetivo de realizar una comparación usando una

simulación en ABAQUS, se precedió a estimar la deflexión máxima en función de la temperatura. La Figura 4.17 muestra los resultados.



(a) Probeta I, Temperatura vs. Deformación (b) Probeta 2, Temperatura vs. Deformación

Figura 4.17: Variación de Deflexión vs. Variación en Temperatura (P-1D de 100MXC sobre Aluminio).

Como se puede apreciar de la Figura 4.17, la deflexión satisface un comportamiento lineal como se esperaba y los valores máximos son relativamente pequeños lo que explica la dificultad visual que presentaba la detección de la deformación. A continuación se cotejarán los resultados con el Modelo Teórico en Elementos Finitos.

### Simulación P-1D

La simulación se realizó en ABAQUS diseñando los elementos en INVENTOR PROFESIONAL 2013 y exportándolos hacia ABAQUS como componentes separados. Las características de la Simulación para cada uno de los elementos así como sus respectivos resultados se muestra a continuación. La Figura diseñada en INVENTOR se muestra en la Figura 4.18:

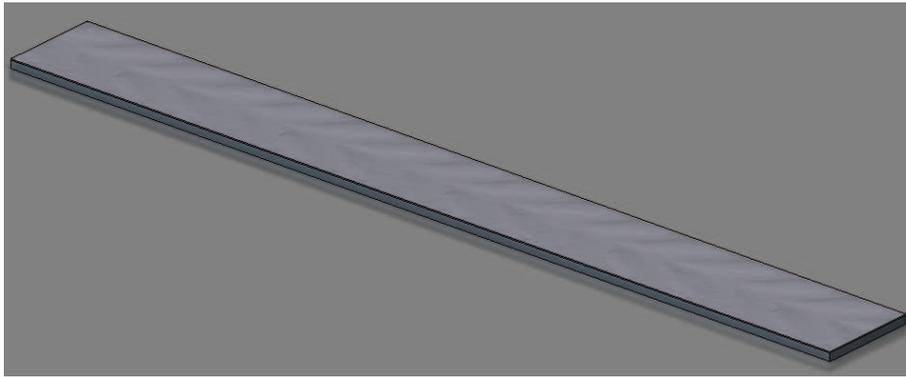


Figura 4.18: Modelo Tridimensional de la Pieza Alargada hecho en INVENTOR.

Los valores introducidos en ABAQUS respecto a las condiciones de borde, propiedades del materiales y demás se muestran a continuación:

1. **Propiedades de los Materiales.**- Las propiedades de construcción de las piezas y que fueron introducidas en las parte de *Materiales* en ABAQUS, se muestran en la Tabla 4.7:

Propiedades del Bimetal	
CTE Sustrato	$22,2 \cdot 10^{-6} C^{-1}$
CTE Depósito	$13 \cdot 10^{-6} C^{-1}$
Espesor Sustrato	$2mm$
Espesor Depósito	$0,2mm$
Largo de la Probeta	$250mm$
Ancho de la Probeta	$25mm$
Conductividad Sustrato	$0,237W/^{\circ}Cmm$
Conductividad Depósito	$0,043W/^{\circ}Cmm$
Densidad Sustrato	$2,7 \cdot 10^{-6} Kg/mm^3$
Densidad Depósito	$8 \cdot 10^{-6} Kg/mm^3$
Módulo de Young Sustrato	$69000N/mm^2$
Módulo de Young Depósito	$96000N/mm^2$
Coefficiente de Poisson Sustrato	0,3
Calor Específico Sustrato	$870J/Kg^{\circ}C$
Calor Específico Depósito	$436J/Kg^{\circ}C$

Cuadro 4.7: Propiedades de la probeta alargada de 100MXC sobre Aluminio.

2. **Condiciones de Borde.**- Las condiciones de borde establecidas fueron de dos tipos: de desplazamiento y de temperatura. Se asumieron que las

esquinas de la placa se encontraban simplemente apoyadas como se muestra en la Figura 4.19:

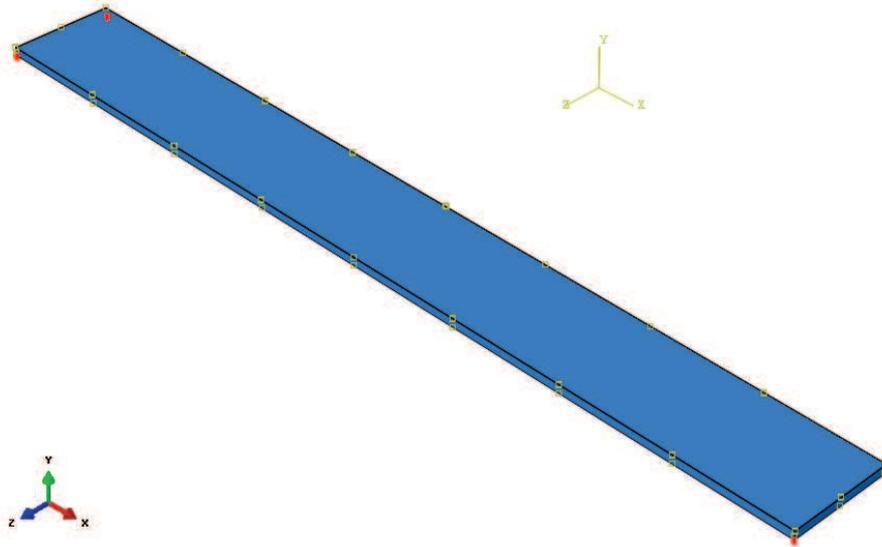


Figura 4.19: Condiciones de Borde ABAQUS.

3. **Predetermined Fields.-** Además, se puso como condición de borde que la temperatura inicial de la placa sería de  $25^{\circ}C$ . Esto se hizo a través de la opción *Predetermined Fields* de ABAQUS. La temperatura final se elevó a  $100^{\circ}C$ . El proceso de calentamiento no presentaba mayor información por lo que se estimó que la temperatura incrementaba linealmente hasta  $100^{\circ}C$ .
4. **Constrains.-** Con el objetivo de simular el efecto de unión (*bonding*) entre el sustrato y el depósito, se creo un constrain *Surface to Surface* que simulaba una interface con perfecta unión entre las caras en contacto de las dos partes.
5. **Mallado.-** El Mallado se lo construyó lo más fino posible, tomando un espaciamento de  $0,025mm$  transversalmente y  $5mm$  en las caras superiores. Espaciamientos menores causaban que el sistema sufría de deficiencia de memoria RAM.

Tras simular una incremento de temperatura de  $25C^{\circ}$  a  $100C^{\circ}$  se obtuvieron

los siguiente resultados. La Figura 4.20 muestra la deflexión máxima con un  $\Delta T = 75C^{\circ}$ :

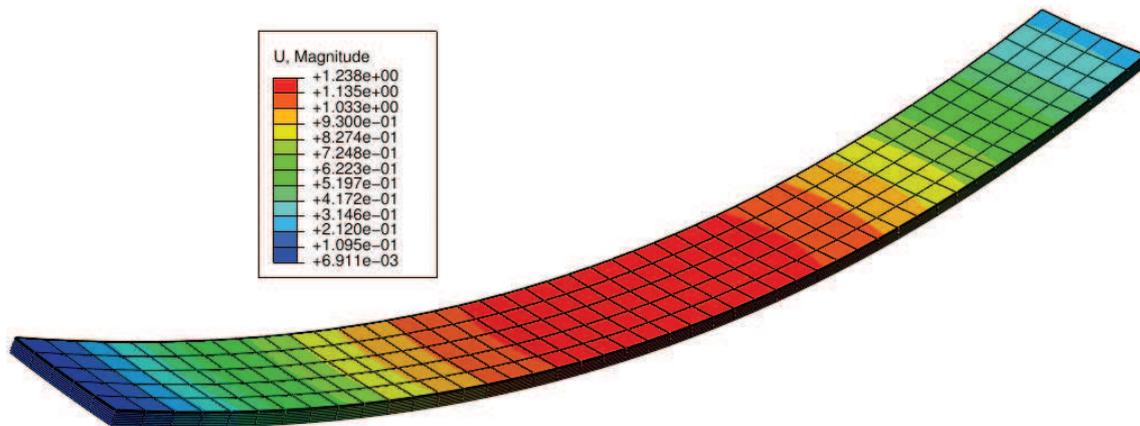


Figura 4.20: Resultados de ABAQUS. Deformación con  $\Delta T = 75^{\circ}C$ .

Se puede ver que la deflexión máxima corresponde a un valor de  $1,23mm$  lo cual es consistente con el valor de  $1,2mm$  obtenido experimentalmente. El error es bajo con un valor aproximado de  $2,5\%$  lo que garantiza no solo que la simulación representa con alta veracidad la deformación debida a esfuerzos térmicos, sino que también asegura que el módulo de Young obtenido experimentalmente es efectivamente el apropiado. Si el módulo ingresado al modelo no hubiese sido el adecuado, los valores de deformación y de la distribución de esfuerzos no hubieran coincidido con los resultado experimentales. Con el objetivo de comparar la distribución de esfuerzos analítica y simulada, se tomaron información de los nodos laterales de la pieza larga. La Figura 4.21 muestra la distribución de esfuerzos transversales.

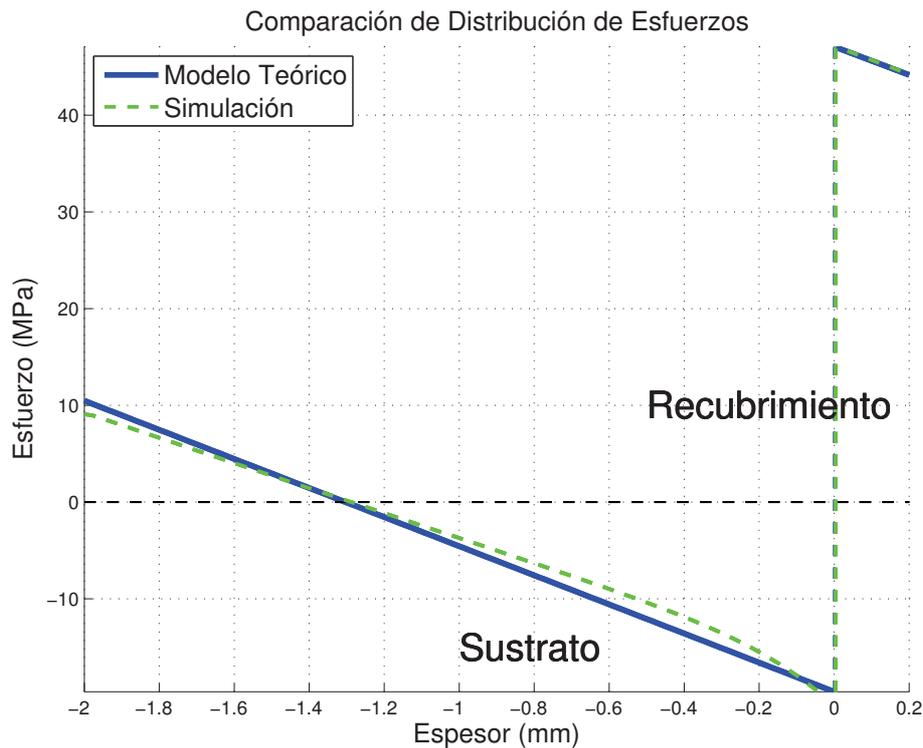


Figura 4.21: Resultados de ABAQUS. Comparación de la distribución de Esfuerzos  $\sigma_{xx}$  con  $\Delta T = 75^{\circ}C$ .

Se puede ver de la Figura 4.21 que la tendencia es muy similar a la distribución de esfuerzos mostrada en la Figura 4.17. La Figura 4.21 nos muestra simultáneamente la distribución de esfuerzo sugerida por el modelo de Timoshenko [Chung(1990)] con el módulo de Young estimado y la distribución de esfuerzos obtenida por medio de ABAQUS. Es claro que ambas tendencias son prácticamente la misma. Esto prueba que la simulación es acorde con el modelo teórico y valida los valores obtenidos experimentalmente. El extremo inferior derecho de las distribuciones de esfuerzo es el que muestra la mayor desviación en linealidad. Ésto implica que aún cuando el modelo lineal es casi idéntico que el de simulación, la simulación muestra una tendencia menos lineal; éste hecho ya había sido identificado por anteriormente en el paper de *Chung* en el que se comparaba la efectividad del modelo lineal, entre otras cosas.

### 4.3.2. Placa Bidimensional con Recubrimiento de Alambre 100MXC sobre sustrato de Aluminio (P-2D)

El análisis bidimensional se llevó a cabo sobre probetas de Aluminio con un recubrimiento de 100MXC (composición descrita en la Tabla 4.5) con las propiedades mostradas en la Tabla 4.8.

Propiedades del Bimetal	
Módulo de Young Sustrato <sup>+</sup>	69GPa
CTE Sustrato <sup>+</sup>	$22,2 \cdot 10^{-6}C^{-1}$
CTE Depósito <sup>+</sup>	$13 \cdot 10^{-6}C^{-1}$
Espesor Sustrato	2mm
Espesor Depósito	0,3mm y 0,18mm
Largo de la Probeta	128mm
Ancho de la Probeta	128mm

Cuadro 4.8: Propiedades de la probeta P-2D de Recubrimiento de alambre 100MXC sobre Sustrato de Aluminio. <sup>+</sup>:Valores de literatura [MatWeb(2014)].

Se analizaron dos probetas de diferentes espesores de recubrimiento. Estas probetas fueron colocadas cuidadosamente sobre la estación de medición como se muestra en la Figura 4.22:

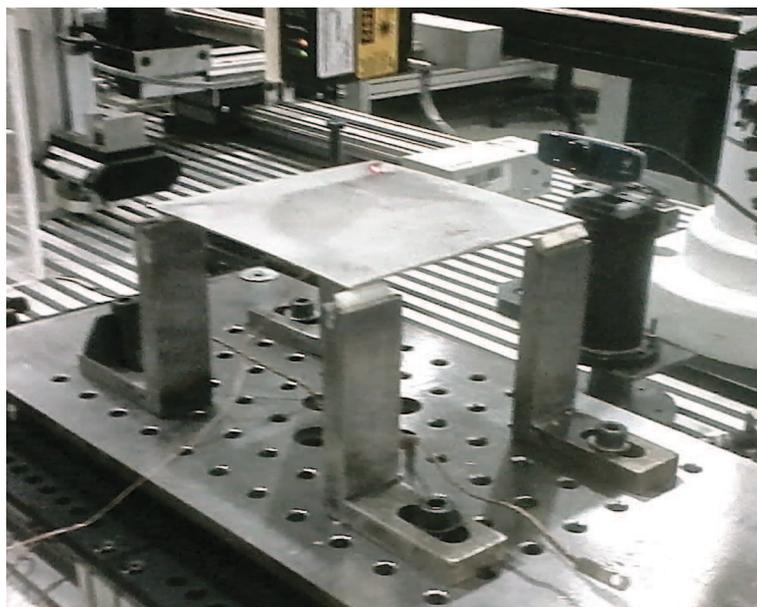


Figura 4.22: Proceso de Medición de curvatura (Placa de 100MXC sobre Aluminio).

Lo datos se tomaron tras varios procesos de escaneo lineales sobre los ejes  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  y  $W$  según la Figura 3.32. Además, se optó por utilizar el método de medición de curvatura a partir de tres puntos para poder corroborar los valores medidos a través del método de un solo punto. La medición de curvatura por tres puntos no solo considera la deflexión en el punto máximo, sino que también considera deflexiones en dos puntos igualmente espaciados a ambos lados del punto de deflexión máxima como se observa en la Figura 4.23:

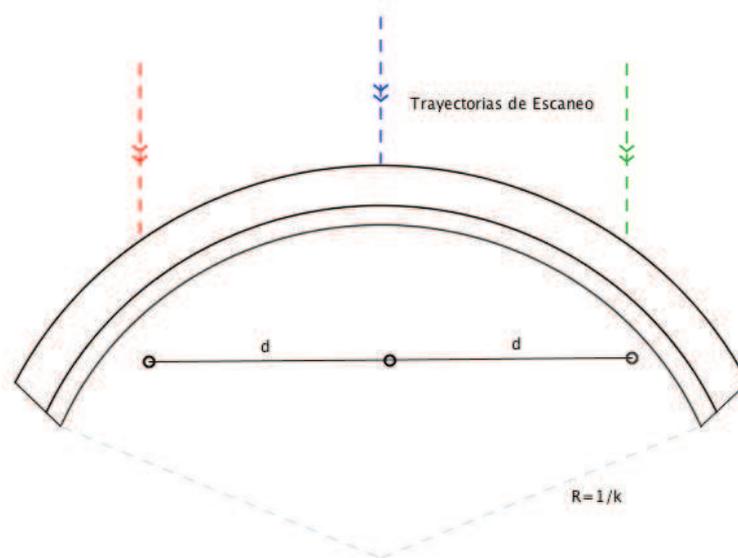


Figura 4.23: Esquema del método de Medición de Curvatura a partir de la medición de la deflexión en tres puntos).

Con la información de la deflexión de dichos tres puntos, es posible determinar la curvatura de la probeta. Para esto, se realizaron dos mediciones una horizontal y otro diagonal como se muestran en la Figura 3.32. El sensor recorrió tres veces sobre la pieza en cada proceso de escaneo. En general, se busca distancia similares entre el patrón del centro y los dos laterales. Las deflexiones para los tres patrones o segmentos se muestra en la Figura 4.24; los colores corresponden a las trayectorias mostradas en la Figura 4.23:

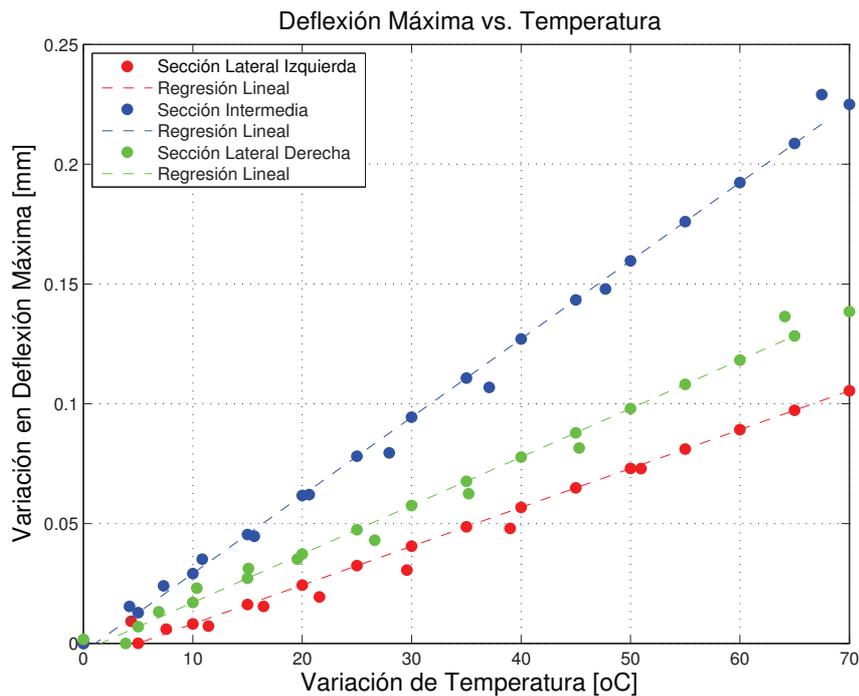


Figura 4.24: Variación de Temperatura vs. Deflexión. Método de los 3 puntos para la probeta II (Placa de 100MXC sobre Aluminio).

Como se ve, las pendientes de los segmentos extremos (Primero y Tercero) son muy similares entre sí debido a que se encuentran a igual distancia del centro. Si bien tienen la misma pendiente, no son co-lineales. Ésto se debe a que si bien en teoría el punto central corresponde al de máxima deflexión y los otros dos puntos están igualmente espaciados; en la práctica determinar el punto de deflexión máxima resulta complejo debido a la curvatura tiene valores muy pequeños. Resulta difícil para el operario encerrar el dispositivo alineándose perfectamente con el punto máximo de deflexión. Aún así, ésto no reduce la validez del método ya que el método funciona para cualquier conjunto de tres puntos. Lo único que produce es que la gráfica muestra curvas paralelas en lugar de co-lineales. Por otro lado, la pendiente del segmento intermedio es mucho más pronunciada lo que implica un incremento mayor en la curvatura. Además, se debe notar Debido a los datos de la Figura 4.24 no coinciden en el eje de las temperaturas; es decir, cada punto de la gráfica está a una temperatura distinta. Esto se debe a que el

proceso de adquisición de datos es en serie, tomando un dato a la vez y considerando cierto enfriamiento entre dato y dato. Por este motivo, se utilizó los valores de la curva linealizada para determinar la curvatura por el método de los tres puntos. Los datos de deflexión de las tres rectas permitieron la interpolación de la curvatura de la pieza a diferentes temperaturas como se muestra en la Figura 4.25. La linealización previa justifica la linealidad perfecta de la Figura 4.25:

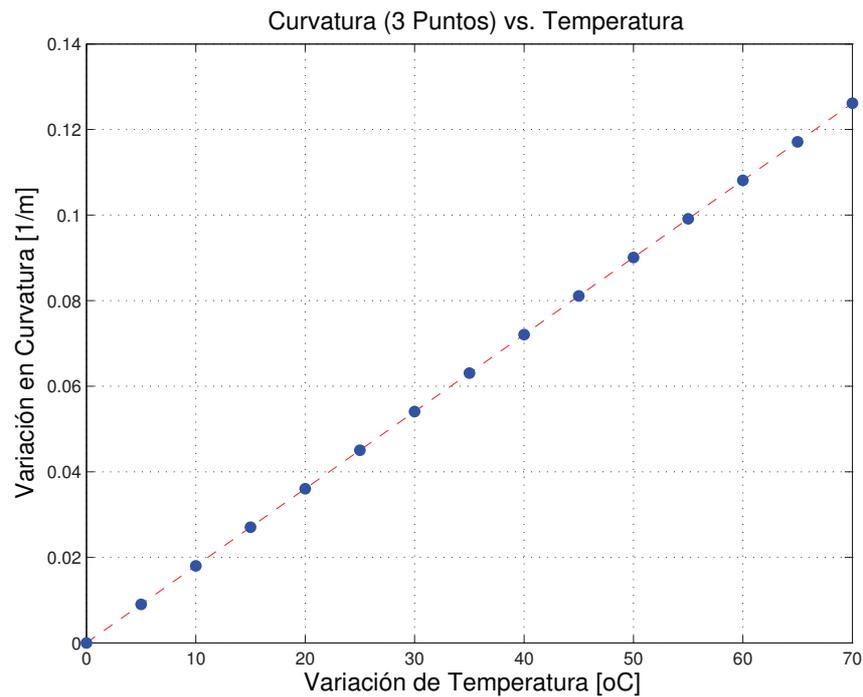


Figura 4.25: Variación de Temperatura vs. Curvatura. Método de los 3 puntos para la probeta II (Placa de 100MXC sobre Aluminio).

Los datos de la deflexión obtenida por el método de los *tres puntos* se graficó junto a los datos de la deflexión obtenida en todos los ejes. Todo ellos se muestran en conjunto en la Figura 4.26. Es fácil apreciar que existe una diferencia notable entre las pendientes de las rectas curvatura vs. temperatura para cada probeta. Con el fin de apreciar la linealidad de cada una de las probetas se las graficó por separado en las Figuras 4.27 y 4.28, respectivamente:

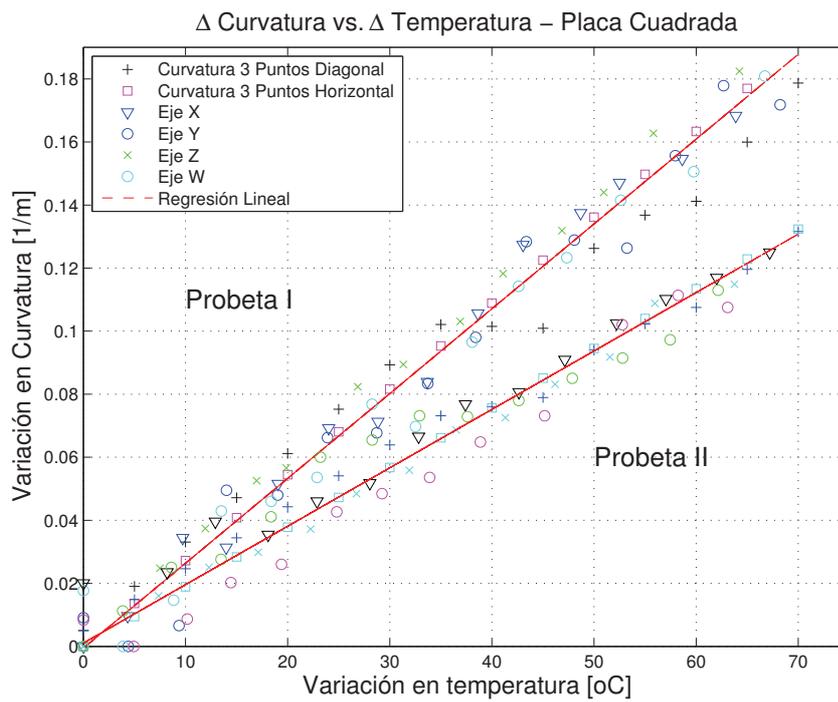


Figura 4.26: Variación de Temperatura vs. Deflexión en los todos los ejes. Probeta I y II (Placa de 100MXC sobre Aluminio).

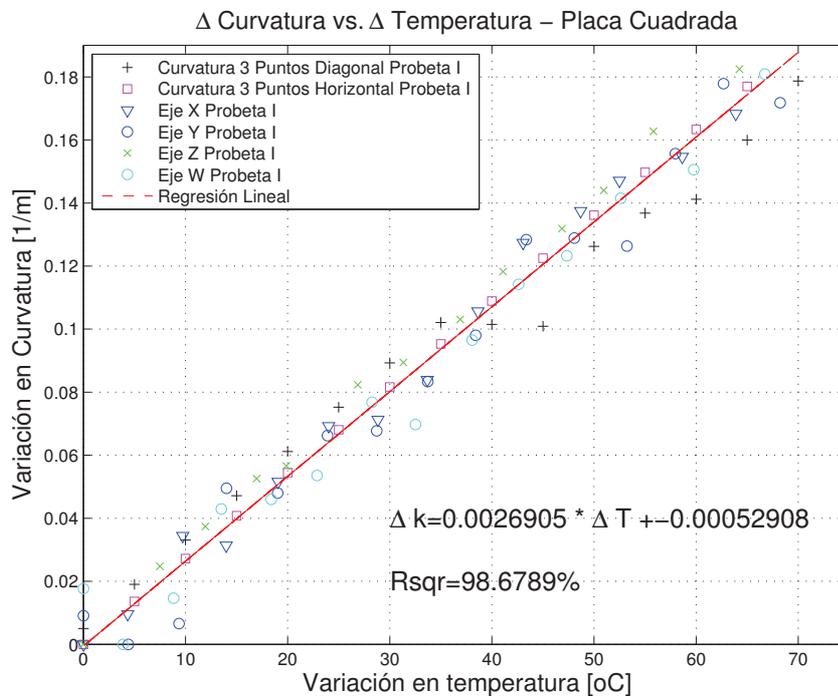


Figura 4.27: Variación de Temperatura vs. Deflexión en los todos los ejes. Probeta I. (Placa de 100MXC sobre Aluminio).

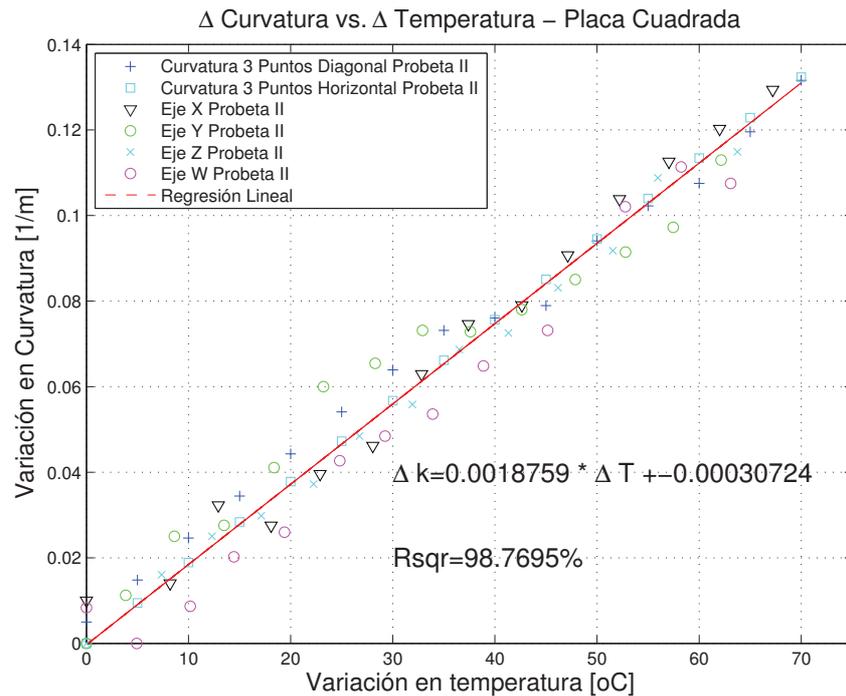


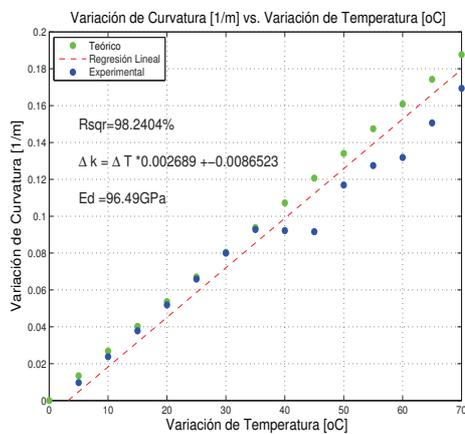
Figura 4.28: Variación de Temperatura vs. Deflexión en los todos los ejes. Probeta II (Placa de 100MXC sobre Aluminio).

Las Figuras 4.27 y 4.28 muestran los datos obtenidos en todos los ejes para las probetas P-2D con recubrimiento térmico. Se logra apreciar el alto porcentaje de linealidad con lo que garantizamos la validez de los resultados. Al tener todos los ejes la misma curvatura se concluye que la deformación será simétrica respecto a un eje perpendicular y centrado sobre la superficie de la pieza. Es decir, la placa deformada adquirirá la forma de un casquete o porción de una esfera. Otro punto de especial atención es la diferencia en la pendiente de la recta temperatura vs. curvatura obtenida para una y otra probeta. En un principio, la razón de esta diferencia resulta de la diferencia entre las medias del espesor del recubrimiento. Mientras la primera probeta tiene un recubrimiento de  $0,3 \pm 0,05 \text{ mm}$ , las segunda solamente alcanza los  $0,18 \pm 0,05 \text{ mm}$ . Según el modelo analizado anteriormente, la pendiente de la curva temperatura vs. curvatura se ve, en efecto, afectada por las dimensiones de la pieza y los espesores del sustrato y recubrimiento. Por ende, resulta congruente tener esta diferencia en pendiente siempre y cuando el

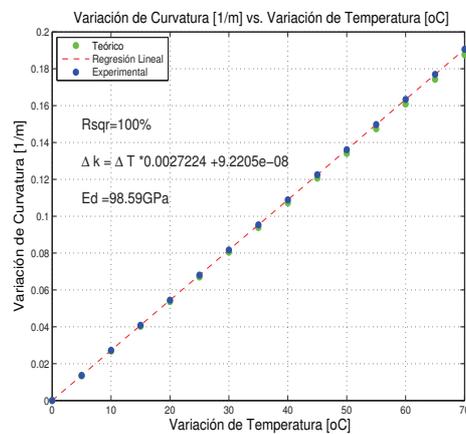
módulo de Young estimado sea aproximadamente el mismo para ambas probetas. Las curvaturas se obtuvieron a partir de la medición de la deflexión utilizando la forma desarrollada por Kanthal [Kanthal(2002)]:

$$k = \frac{8A}{4A^3 + l^2 - 4As} \quad (4.1)$$

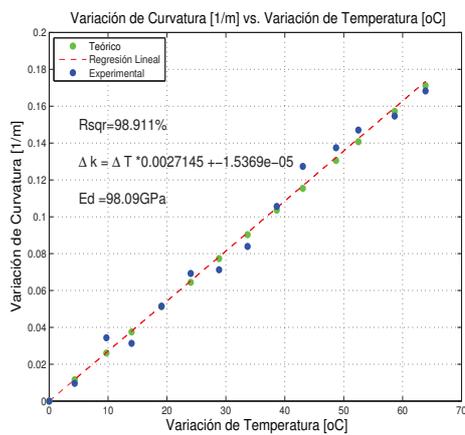
Las curvas curvatura-temperatura y sus respectivos valores del módulo de elasticidad estimados a través de la regresión lineal se muestran en las Figura 4.29 y 4.30 respectivamente.



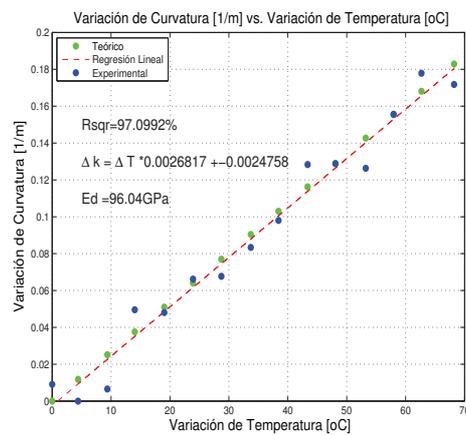
Tres Puntos Diagonal



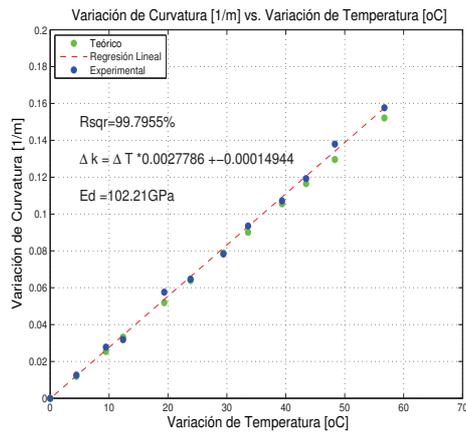
Tres Puntos Horizontal



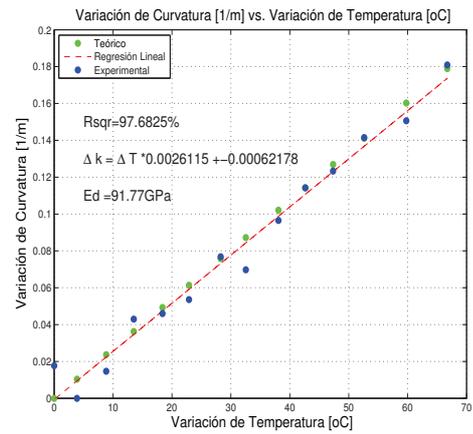
Eje X



Eje Y

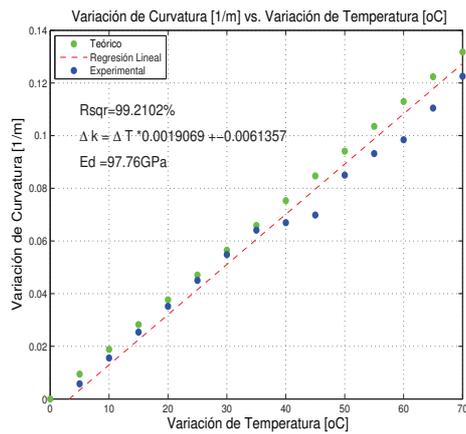


Tres Puntos Diagonal

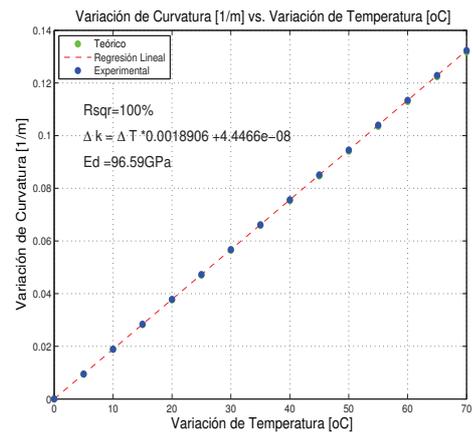


Tres Puntos Horizontal

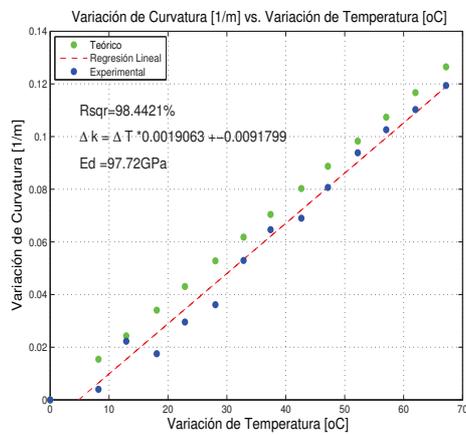
Figura 4.29: Resultados de la medición de Curvatura. Probeta I placa alargada de 100MXC sobre Aluminio. Curvatura vs. Temperatura.



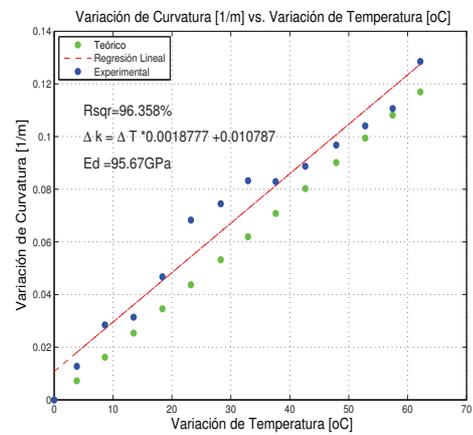
Tres Puntos Diagonal



Tres Puntos Horizontal



Eje X



Eje Y

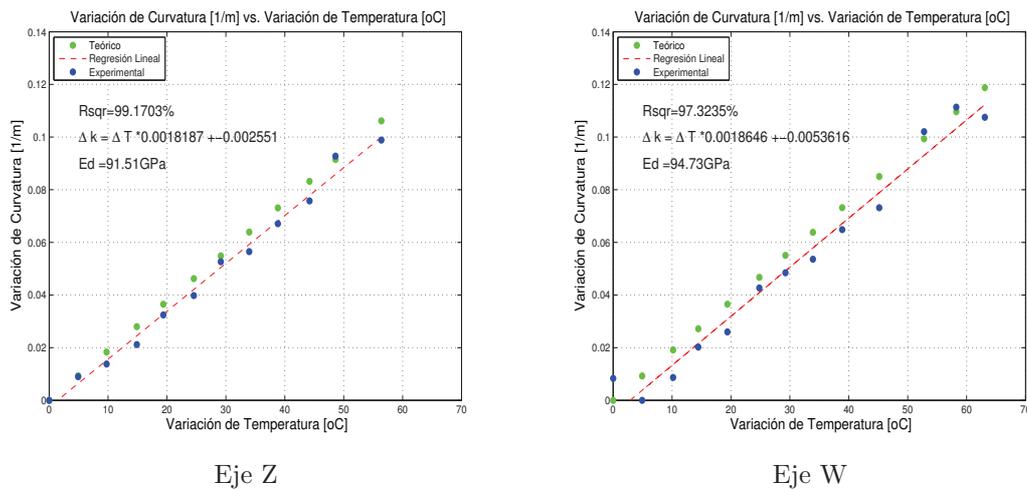


Figura 4.30: Resultados de la medición de Curvatura. Probeta II placa alargada de 100MXC sobre Aluminio. Curvatura vs. Temperatura.

Tomando en cuenta los valores obtenidos en cada eje, un análisis estadístico básico permitirá determinar la media y la desviación estándar de la muestra. Para la primera probeta se obtuvo un media muestral de  $97,19Gpa$  con una desviación estándar de  $3,43Gpa$ . Por el otro lado, para la segunda probeta se obtuvo un media muestral de  $95,66Gpa$  con una desviación estándar de  $2,35Gpa$ . Con el objetivo de probar que las medias de ambas muestras son similares se optó por desarrollar la prueba de hipótesis siguiente:

$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Donde  $\mu_1$  y  $\mu_2$  corresponden a las medias de los módulos de Young de las dos probetas respectivamente. Esta prueba de hipótesis corresponde a una Inferencia de la diferencia de medias de dos distribuciones normales con varianzas desconocidas [Montgomery(2009)]. El estimador utilizado para esta prueba de hipótesis será:

$$t_0 = \frac{\overline{X}_1 - \overline{X}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (4.2)$$

donde  $\overline{X}_i$  se refiere a la media muestral,  $\mu_i$  se refiere a la media población,  $n_i$  corresponde al número de muestra y, por último,  $S_p$  está definido por

[Montgomery(2009)]:

$$S_p = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (4.3)$$

donde  $S_1$  y  $S_2$  corresponden a la desviaciones estándar muestrales de los datos de las dos probetas (I y II), respectivamente. Ahora, si reemplazamos los valores de desviación estándar obtenidos anteriormente y sabiendo que  $n_1 = n_2 = 6$ , tenemos que  $S_p = 2,94$ . Nuevamente, sustituyendo  $S_p$  en el estimador, se obtiene  $t_0 = 0,9$ . Tomando en cuenta un  $\alpha = 5\%$ , se tiene un valor de comparación  $t$  que sigue una distribución T con 10 grados de libertad:  $t_{\alpha/2,10} = 2,228$ . Dado que  $|t_0| \leq |t_{\alpha/2}|$ , entonces se puede concluir que no se rechaza la hipótesis, es decir, no existe evidencia suficiente para determinar que el módulo de Young medido por las dos probetas no sea el mismo al  $\alpha$  (valor estadístico de significancia) del 5%.

Tomando entonces la media total del Módulo de Young como el valor más cercano a la media Real, se tiene  $E_d = 96,43GPa$  Este módulo, bajo el modelo de Timoshenko [Chung(1990)] garantiza la distribución de esfuerzos mostrada en las Figuras 4.31 y 4.32 para cada probeta respectivamente:

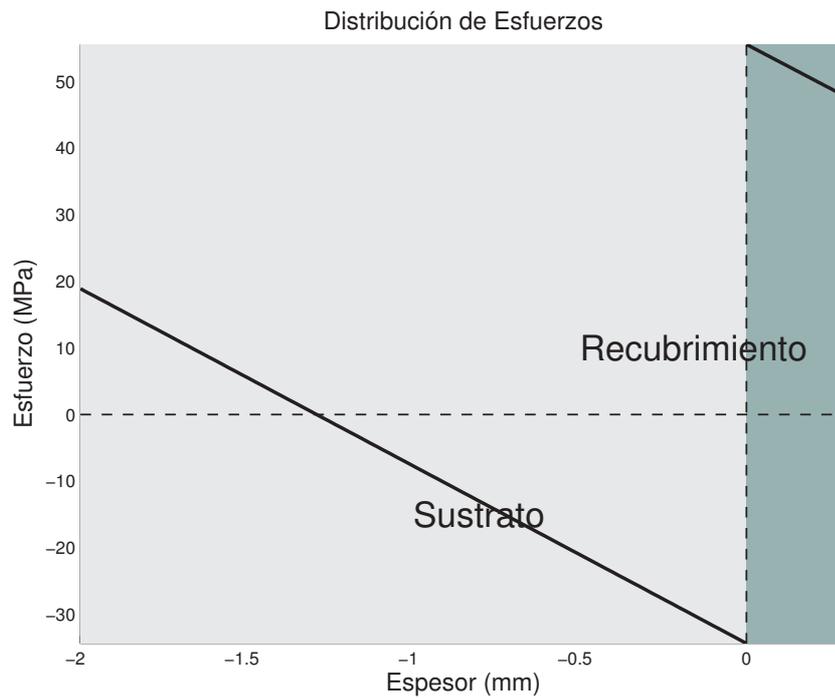


Figura 4.31: Predicción de la Distribución de Esfuerzos en el espesor de la Placa de 100MXC sobre Aluminio. Probeta I (0,3mm) a 100°C.

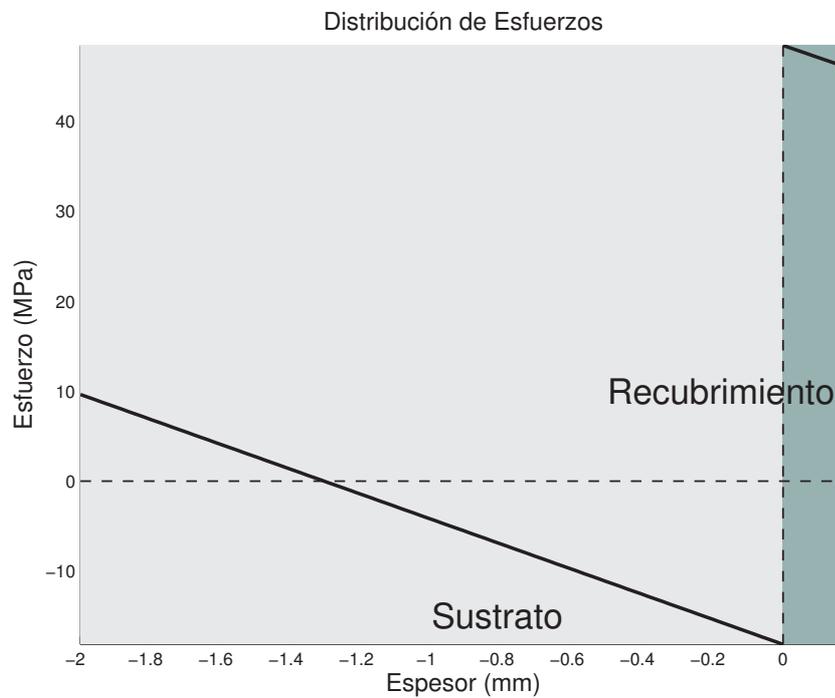
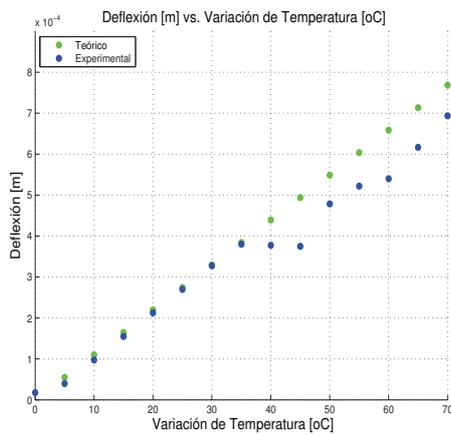
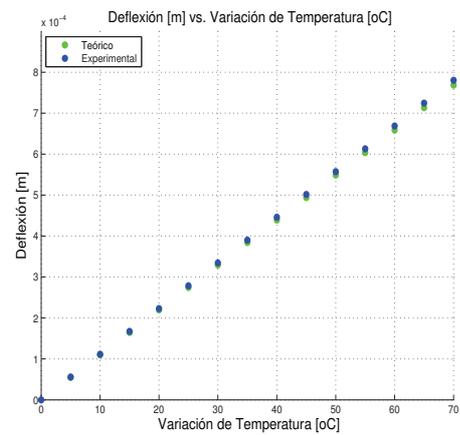


Figura 4.32: Predicción de la Distribución de Esfuerzos en el espesor de la Placa de 100MXC sobre Aluminio. Probeta II (0,18mm) a 100°C.

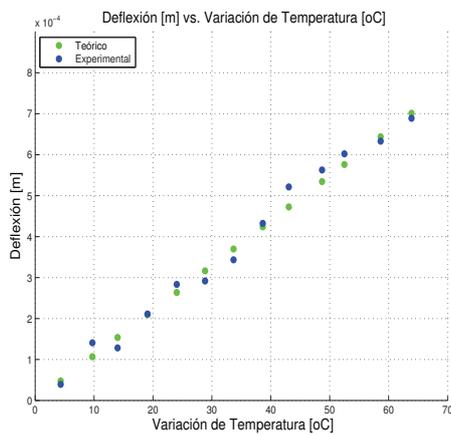
Como se puede apreciar, los esfuerzos son relativamente bajos sin superar los  $55\text{MPa}$ . Esto garantiza que durante la adquisición de datos no se superaron nunca los esfuerzos de fluencia del material y, por ende, nunca se superó el límite elástico de los materiales. Por último, con el objetivo de realizar una comparación con simulaciones hecha en ABAQUS, se procedió a estimar la deflexión máxima en función de la temperatura. Las Figuras 4.33 y 4.34 muestra los resultados.



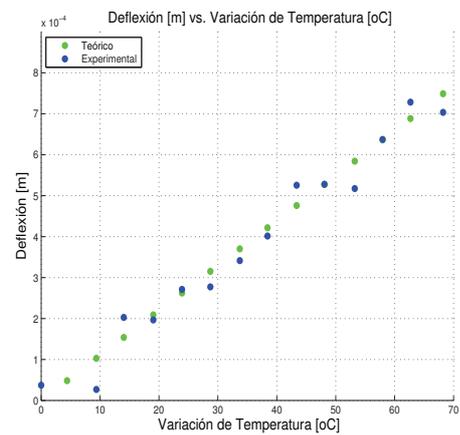
Tres Puntos Diagona



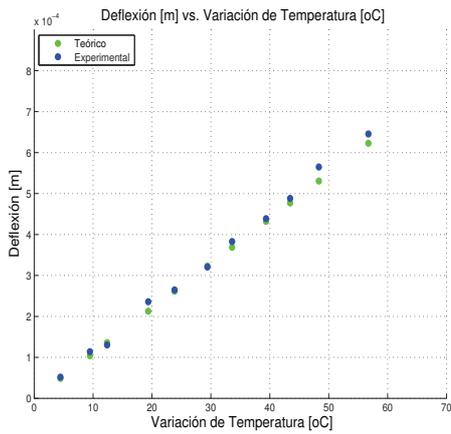
Tres Puntos Horizontal



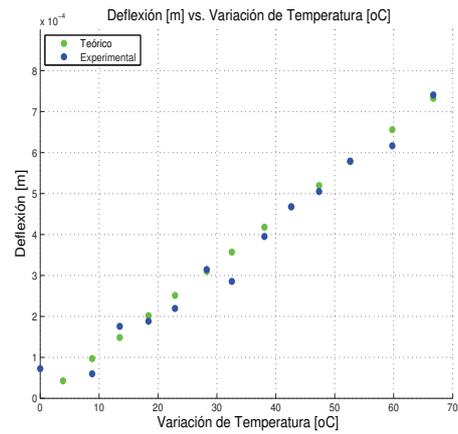
Eje X



Eje Y

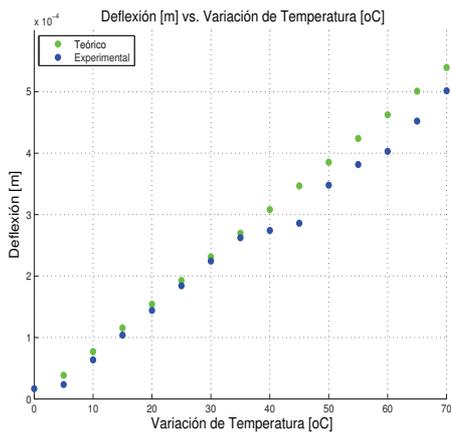


Eje Z

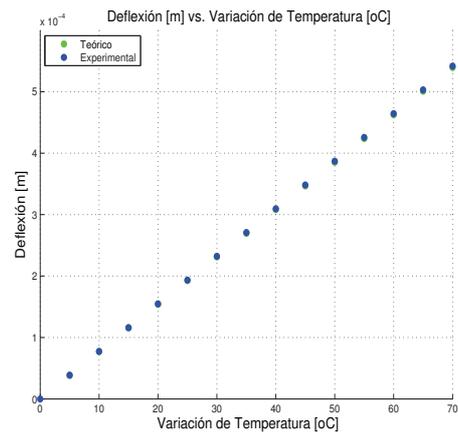


Eje W

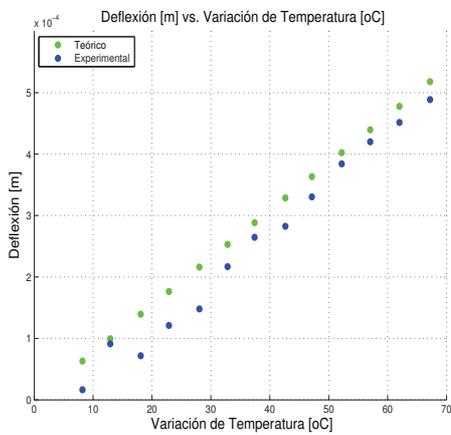
Figura 4.33: Resultados de la medición de la Deflexión. Probeta I P-2D de 100MXC sobre Aluminio. Deflexión vs. Temperatura.



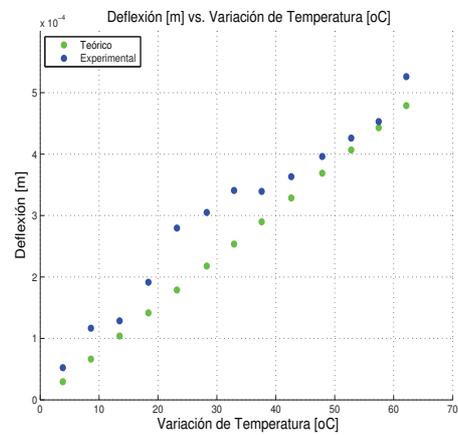
Tres Puntos Diagona



Tres Puntos Horizontal



Eje X



Eje Y

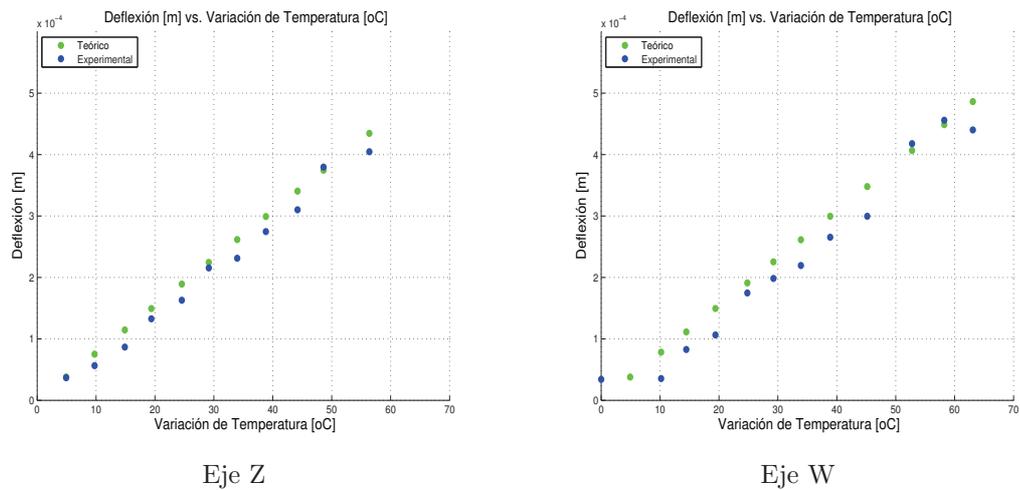


Figura 4.34: Resultados de la medición de la Deflexión. Probeta II P-2D de 100MXC sobre Aluminio. Deflexión vs. Temperatura.

Como se puede apreciar en las Figuras 4.30 y 4.33 , la deflexión satisface un comportamiento lineal como se esperaba y los valores máximos son relativamente pequeños lo que explica la dificultad visual que presentaba la detección de la deformación. Se puede notar que para una variación de temperatura de  $75^{\circ}C$  se observa una deflexión de  $0,85mm$  para la probeta I y de  $0,6mm$  para la probeta II. A continuación se cotejarán estos resultados con el Modelo Teórico en Elementos Finitos.

### Simulación P-2D

La pieza de análisis se recreó en el programa de diseño virtual INVENTOR PROFESSIONAL 2013; la Figura 4.35 muestra el Modelo tridimensional:

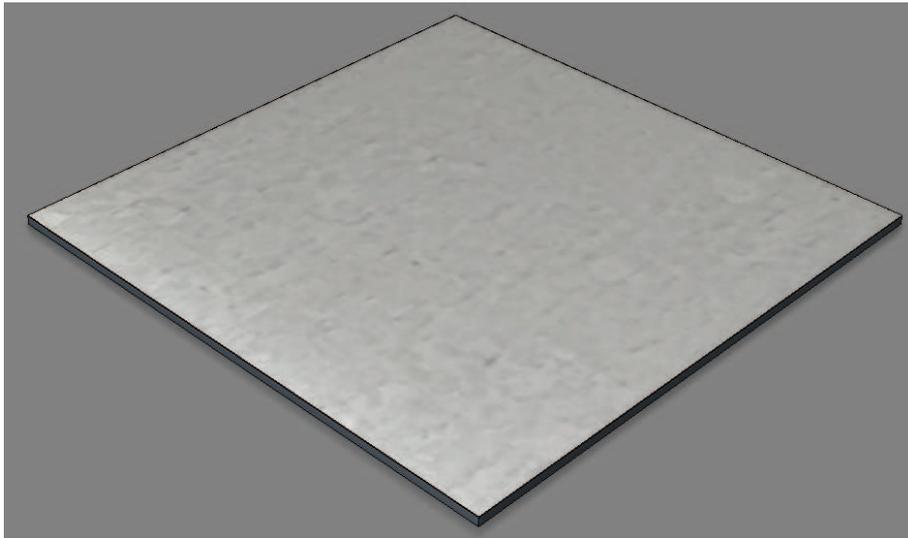


Figura 4.35: Modelo Tridimensional de la Pieza Cuadrada diseñado en INVENTOR PROFESSIONAL 2013.

Los valores introducidos en ABAQUS respecto a las condiciones de borde, propiedades del materiales y demás fueron idénticas a las de la simulación unidimensional por lo que se omiten en esta sección. Se tiene que hacer una distinción entre probetas debido a que para este caso, existieron dos probetas con grosores de recubrimientos distintos.

**Probeta con recubrimiento de  $0,30mm$**  Tras simular una incremento de temperatura de  $25C^o$  a  $100C^o$  se obtuvieron los siguientes resultados. La Figura 4.36 muestra la deflexión máxima con un  $\Delta T = 75C^o$ :

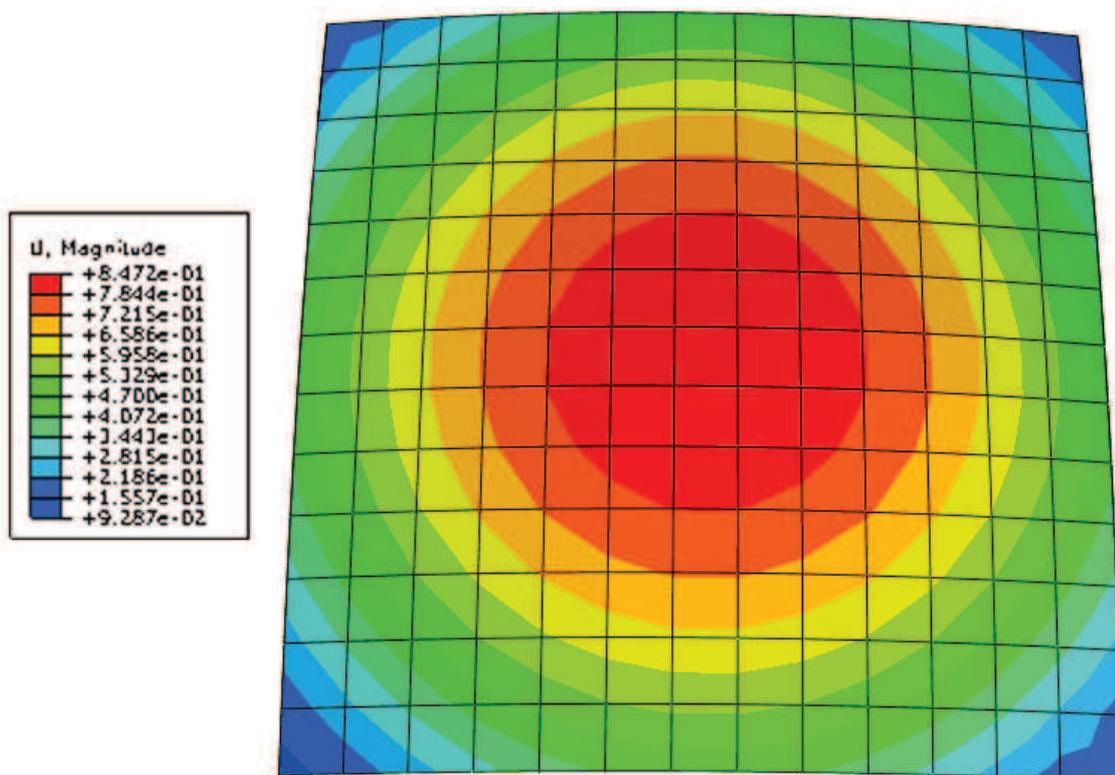


Figura 4.36: Resultados de ABAQUS. Deformación con  $\Delta T = 75^{\circ}C$ .

Se puede ver que la deflexión máxima corresponde a un valor de  $0,847mm$  lo cual es consistente con el valor de  $0,8mm$  obtenido experimentalmente. El error es bajo con un valor aproximado de  $1\%$  lo que garantiza no solo que la simulación representa con alta veracidad la deformación debida a esfuerzos térmicos, sino que también asegura que el módulo de Young obtenido experimentalmente es efectivamente el apropiado. Si el módulo ingresado al modelo no hubiese sido el adecuado, los valores de deformación y de la distribución de esfuerzos no hubieran coincidido con los resultado experimentales. Con el objetivo de comparar la distribución de esfuerzos analítica y simulada, se tomaron información de los nodos laterales de la pieza larga. La Figura 4.37 muestra la distribución de esfuerzos transversales.

Se puede ver de la Figura 4.37 que la tendencia es muy similar a la distribución de esfuerzos mostrada en la Figura 4.32. Con el objetivo de analizar a profundidad las diferencias se comparó la curva teórica vs la curva obtenida tras la simulación:

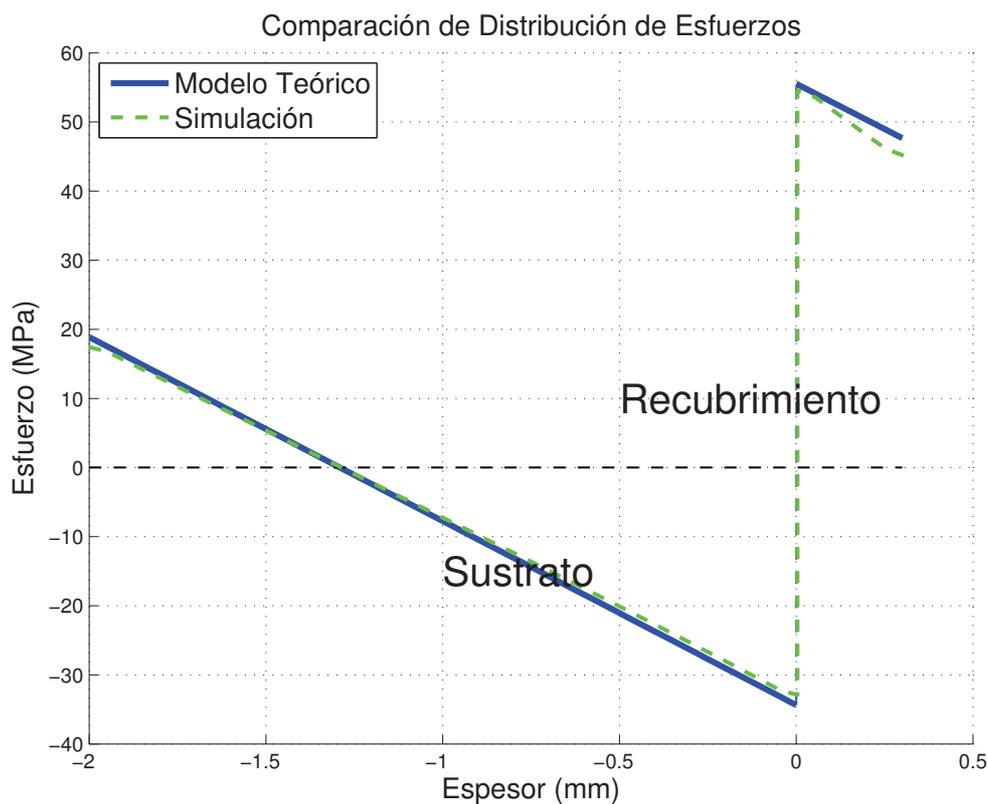


Figura 4.37: Resultados de ABAQUS. Comparación de la distribución de Esfuerzos  $\sigma_{xx}$  con  $\Delta T = 75^{\circ}C$ .

La Figura 4.37 muestra simultáneamente la distribución de esfuerzo sugerida por el modelo de Timoshenko [Chung(1990)] con el módulo de Young estimado y la distribución de esfuerzos obtenida por medio de ABAQUS. Es claro que ambas tendencias son prácticamente la misma. El extremo superior derecho de las distribuciones de esfuerzo es el que muestra la mayor desviación con respecto al modelo lineal. Ésto implica que aún cuando el modelo lineal es casi idéntico que el de simulación, la simulación muestra una tendencia menos lineal; éste hecho ya había sido identificado por anteriormente en el paper de *Chung* en el que se comparaba la efectividad del modelo lineal, entre otras cosas.

**Probeta con recubrimiento de 0,18mm** Tras simular una incremento de temperatura de  $25^{\circ}C$  a  $100^{\circ}C$  se obtuvieron los siguientes resultados. La Figura 4.38 muestra la deflexión máxima con un  $\Delta T = 75^{\circ}C$ :

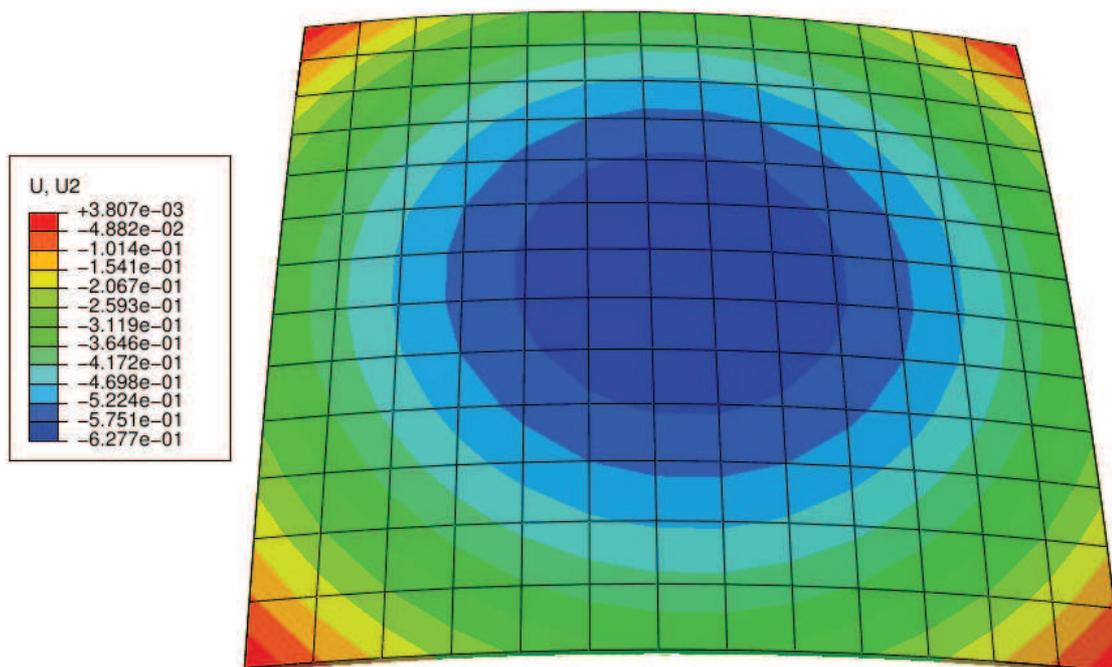


Figura 4.38: Resultados de ABAQUS. Deformación con  $\Delta T = 75^{\circ}C$ . Los valores de esfuerzos están expresados en  $MPa$ .

Se puede ver que la deflexión máxima corresponde a un valor de  $0,6277mm$  lo cual es consistente con el valor de  $0,6mm$  obtenido experimentalmente. El error es bajo con un valor aproximado de  $4,4\%$  lo que garantiza no solo que la simulación representa con alta veracidad la deformación debida a esfuerzos térmicos, sino que también asegura que el módulo de Young obtenido experimentalmente es efectivamente el apropiado. Con el objetivo de comparar la distribución de esfuerzos analítica y simulada, se tomaron información de los nodos laterales de la probeta P-2D. La Figura 4.39 muestra la distribución de esfuerzos transversales.

Se puede ver de la Figura que la tendencia es muy similar a la distribución de esfuerzos mostrada en la Figura 4.31. Con el objetivo de analizar a profundidad las diferencias se comparó la curva teórica vs la curva obtenida tras la simulación:

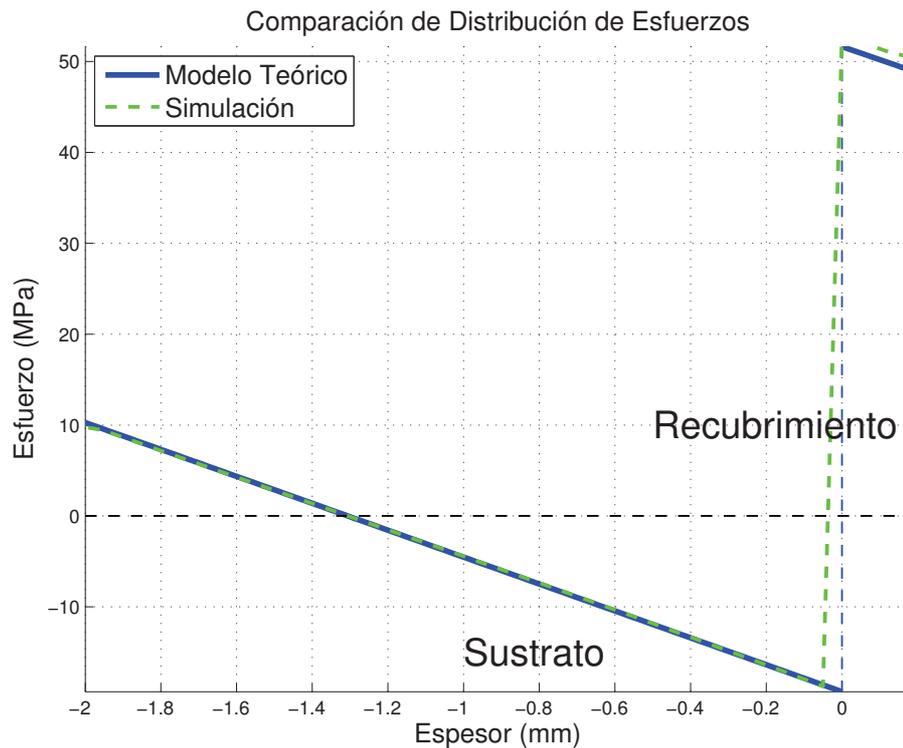


Figura 4.39: Resultados de ABAQUS. Comparación de la distribución de Esfuerzos  $\sigma_{xx}$  con  $\Delta T = 75^{\circ}C$ .

La Figura 4.39 nos muestra simultáneamente la distribución de esfuerzo sugerida por el modelo de Timoshenko [Chung(1990)] con el módulo de Young estimado y la distribución de esfuerzos obtenida por medio de ABAQUS. Es claro que ambas tendencias son prácticamente la misma. La variación brusca en el límite entre sustrato y recubrimiento no se debe a un efecto físico sino a la discretización del espesor que se hace más visible al ser menor el recubrimiento. Si se aumentaran el mallado se reduciría esta desviación hasta ser casi imperceptible.

### 4.3.3. Álabe con Recubrimiento de Alambre 100MXC sobre sustrato de Aluminio (P-3D)

El análisis tridimensional se llevó a cabo sobre probetas de Aluminio con un recubrimiento de 100MXC (composición descrita en la Tabla 4.5) con las propiedades mostradas en la Tabla 4.9 y moldeada a la forma de la cara exterior

de un álabe perteneciente a una turbina ABB.

Propiedades del Bimetal	
Módulo de Young Sustrato <sup>+</sup>	69GPa
CTE Sustrato <sup>+</sup>	$22,2 \cdot 10^{-6} C^{-1}$
CTE Depósito <sup>+</sup>	$13 \cdot 10^{-6} C^{-1}$
Espesor Sustrato	2mm
Espesor Depósito	0,4mm
Largo de la Probeta	90mm
Ancho de la Probeta	38mm

Cuadro 4.9: Propiedades de la probeta P-3D de Recubrimiento de alambre 100MXC sobre Sustrato de Aluminio. <sup>+</sup>:Valores de literatura [MatWeb(2014)].

Estas probetas fueron colocadas cuidadosamente sobre la estación de medición como se muestra en la Figura 4.40. El proceso de escaneo se completó en cuatro barridos longitudinales a una distancia de 5mm entre ellos.

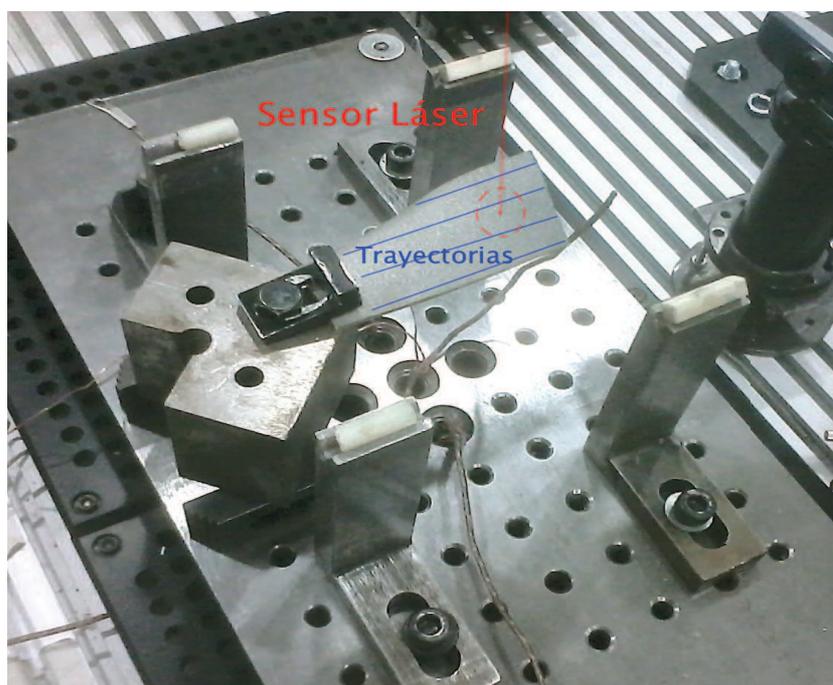


Figura 4.40: Proceso de Deformación (álabe de 100MXC sobre Aluminio).

Se tomaron datos a diversas temperaturas para conseguir la reconstrucción geométrica de las piezas. Las Figuras 4.41 y 4.42 para la probeta I y las Figuras 4.43 - 4.44 muestran la geometría y la deformación sufrida en el proceso de





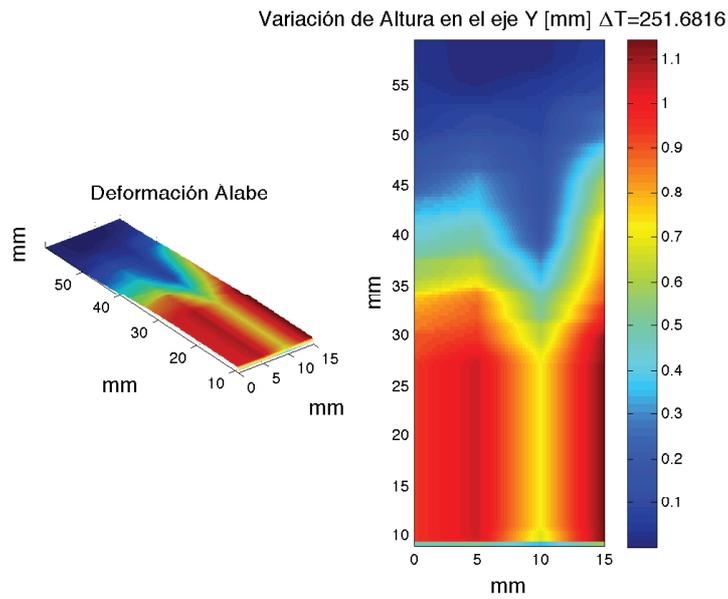


Figura 4.45: Deformación con  $\Delta T = 250C^{\circ}$ . Probeta I.

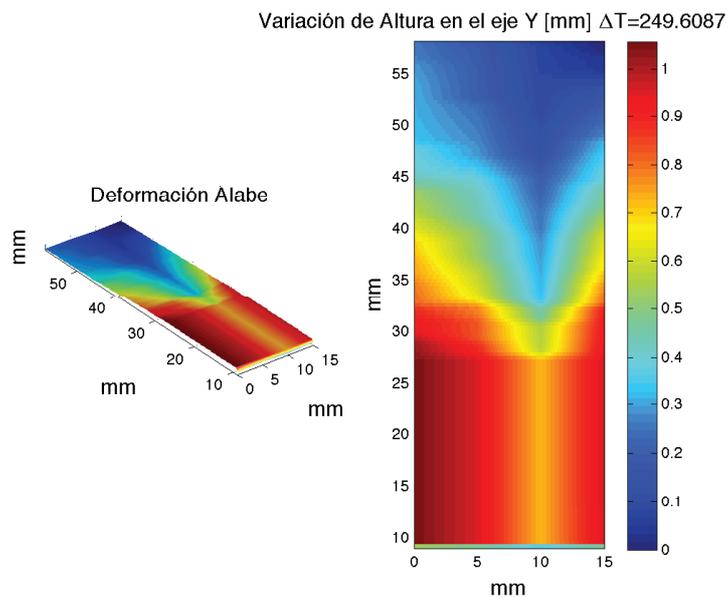


Figura 4.46: Deformación con  $\Delta T = 250C^{\circ}$ . Probeta II.

Los valores máximos de deformación son relativamente pequeños lo que explica la dificultad visual que presentaba la detección de la deformación. Se puede decir que la deflexión debida a un gradiente de temperatura fue de  $1,2mm$  para la probeta I y de  $1,1mm$  para la probeta II en la parte más alejada del soporte. A continuación se cotejarán los resultados con el Modelo Teórico en Elementos

Finitos.

### Simulación P-3D

La Figura diseñada en INVENTOR se muestra en la Figura 4.47:



Figura 4.47: Modelo Tridimensional de la Pieza en forma de álabe hecho en INVENTOR.

Esta geometría fue extrapolada de mediciones directas de la réplica. En la Figura 4.48 se muestran en un mismo gráfico la réplica construida en INVENTOR y la sección escaneada. Se puede notar que la geometría es considerablemente parecida. Existe una pequeña desviación angular debida a la dificultad de recrear la pieza en INVENTOR. Para la recreación se consideraron únicamente 3 planos transversales de la pieza. Esta discretización explicaría la diferencia entre los dos modelos. La razón por la que la medición es de menor tamaño que la réplica completa es que la pieza salió del rango de medición del sensor en los extremos; por ende, resultó necesario escanear una sección menor para no salir del espacio de trabajo.



Figura 4.48: Modelo Tridimensional de la Pieza en forma de álabe hecho en INVENTOR vs. la pieza escaneada.

Los valores introducidos en ABAQUS respecto a las propiedades del materiales y demás fueron idénticas a las de la simulación unidimensional por lo que se omiten en esta sección. La única diferencia radica en las condiciones de borde que son las que se exponen en la Figura 4.49.



Figura 4.49: Condiciones de borde modelamiento álabes.

Se puede apreciar en la Figura 4.49 que se está simulando un anclaje perfecto en el extremo izquierdo del álabes. Tras simular un incremento de temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  a  $2750^{\circ}\text{C}$  se obtuvieron los siguientes resultados. La Figura 4.50 muestra la deflexión absoluta en el eje  $y$  con un  $\Delta T = 250^{\circ}\text{C}$ :

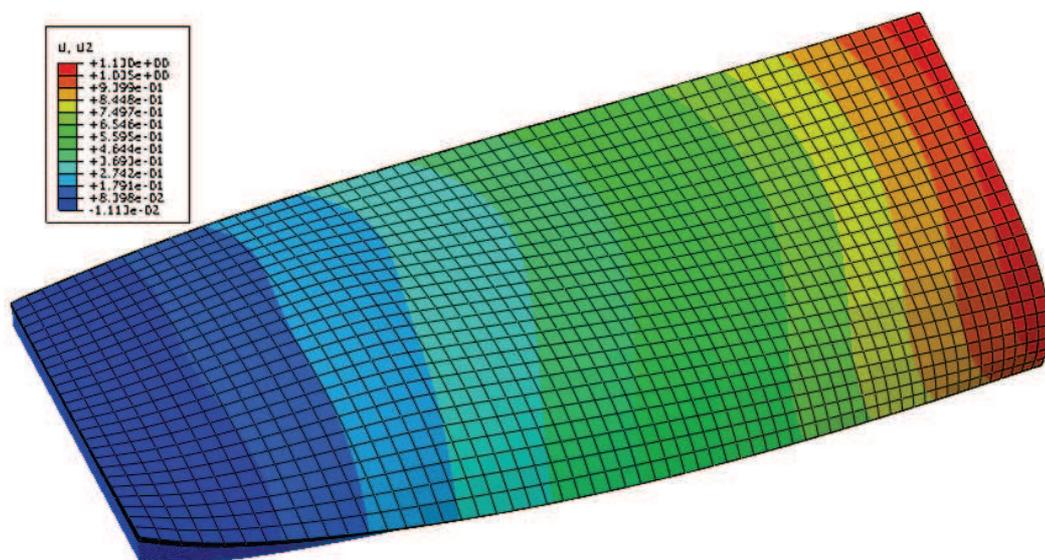


Figura 4.50: Resultados de ABAQUS. Deformación en el eje  $Y$  con un delta de  $\Delta T = 250^{\circ}\text{C}$ .

Esta deformación es la que se puede medir con el sistema de adquisición de datos fabricado. Dado que la trayectoria del paso del láser es idéntica para todos los tiempos de muestreo, es necesario asegurar que la deformación de la pieza en los otros ejes sea insignificante en relación con la deformación en el eje  $Y$ . De no ser así, la deformación medida por el sensor no correspondería con la de la simulación. Esas es la respuesta esperada ya que el álabe está recubierto por un solo lado. Con el objetivo de corroborar esta condición, se procedió a graficar la magnitud del desplazamiento de cada uno de los nodos de la malla, como se muestra en la Figura 4.51. Esta magnitud considera el valor del desplazamiento en todos los ejes:

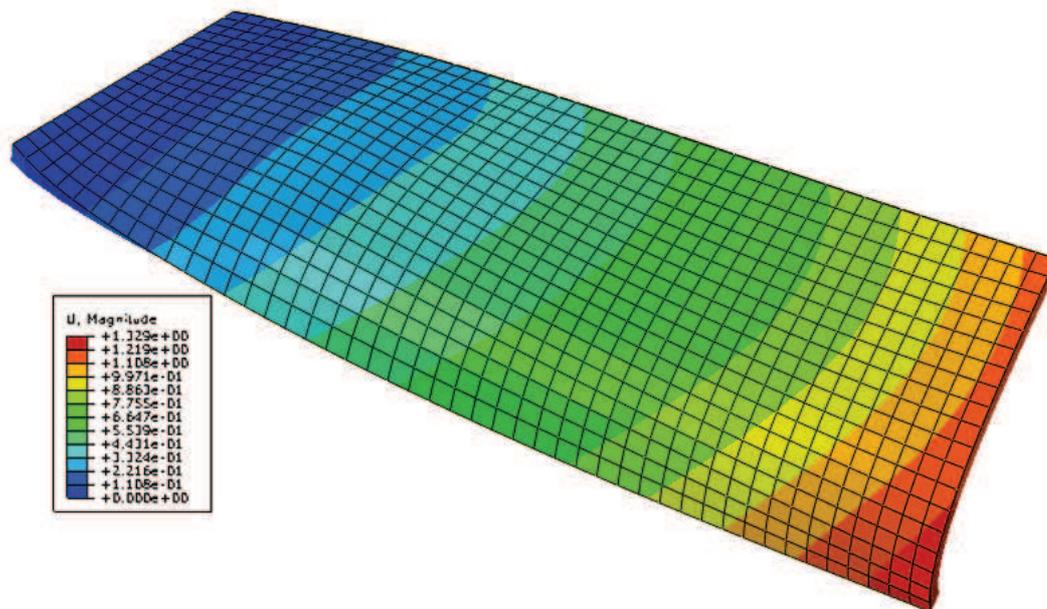


Figura 4.51: Resultados de ABAQUS. Deformación Total con un delta de  $\Delta T = 250^{\circ}C$ .

Es evidente, a partir de la Figura 4.51, que las magnitudes del desplazamiento son casi idénticas a los desplazamientos en el eje  $Y$  con una diferencia de  $0,15mm$ ; esto asegura que las deformaciones en los otros ejes ( $X$  y  $Z$ ) son mínimas y por lo tanto no afectarán demasiado la comparación teórico-práctica. Por otro lado, la deflexión experimental tuvo un valor aproximado de  $1,1mm$  mientras que la deflexión obtenida por la simulación tiene un valor de  $1,13mm$ . Esto produce un

error del 2,65 % aproximadamente. En principio, este error se justificaría por la deformación en los otros ejes mencionada anteriormente. Dado que el sensor solo determina deformaciones verticales, cualquier traslación o rotación de la pieza es interpretado como una incremento en la deformación vertical. Así, el valor de  $0,15\text{mm}$  de deformación en el eje  $X$  y/o  $Z$  pudo haber sido interpretado por el sistema como una deformación vertical e influenciar el valor experimental. Aún así, los valores se encuentran muy próximos y son suficientes para asegurar que la simulación y el modelo experimental son idénticos. Lo que también asegura que el valor adoptado del Módulo de Elasticidad del recubrimiento es correcto y corresponde a los valores experimentales de las probetas de 2D y 3D.

A partir de esta última conclusión, se puede considerar que los esfuerzos del modelo de simulación serán los correspondientes al modelo experimental. De la Figura 4.52 a la Figura 4.56 se muestran los diagramas de esfuerzos de Von Mises obtenidos en ABAQUS:

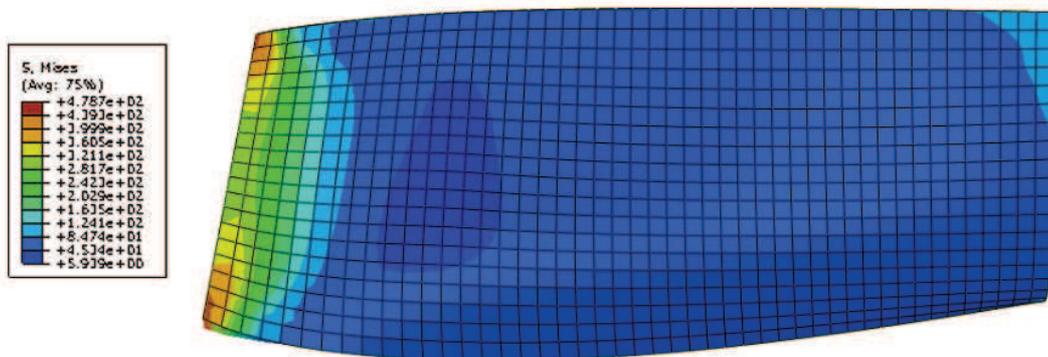


Figura 4.52: Resultados de ABAQUS. Esfuerzos  $\sigma_{Mises}$  Cara Frontal con  $\Delta T = 250^{\circ}\text{C}$ .

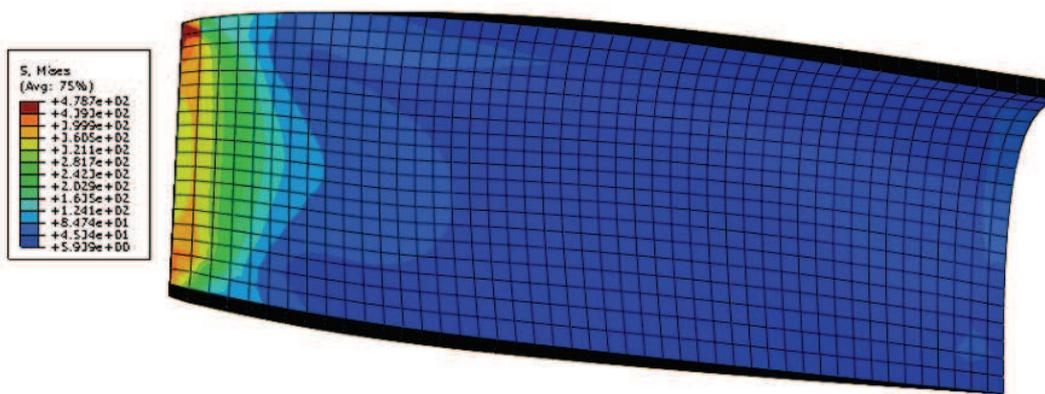


Figura 4.53: Resultados de ABAQUS. Esfuerzos  $\sigma_{Mises}$  Cara Posterior con  $\Delta T = 250^{\circ}C$ .

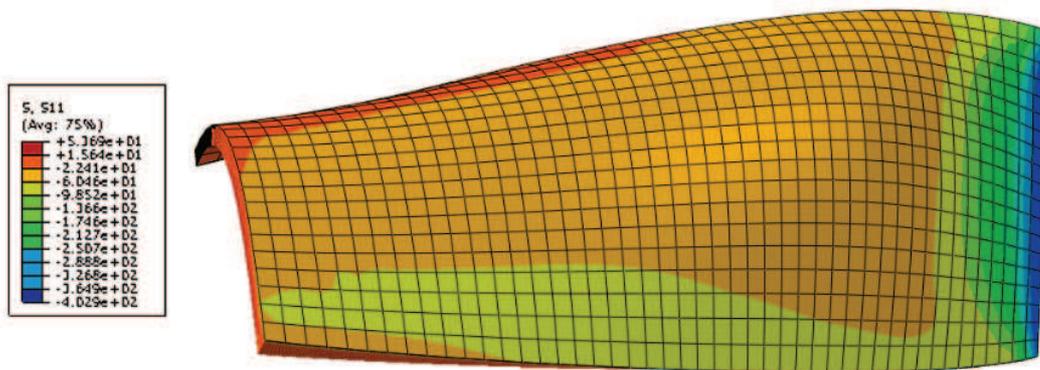


Figura 4.54: Resultados de ABAQUS. Esfuerzos  $\sigma_{xx}$  Cara Frontal con  $\Delta T = 250^{\circ}C$ .

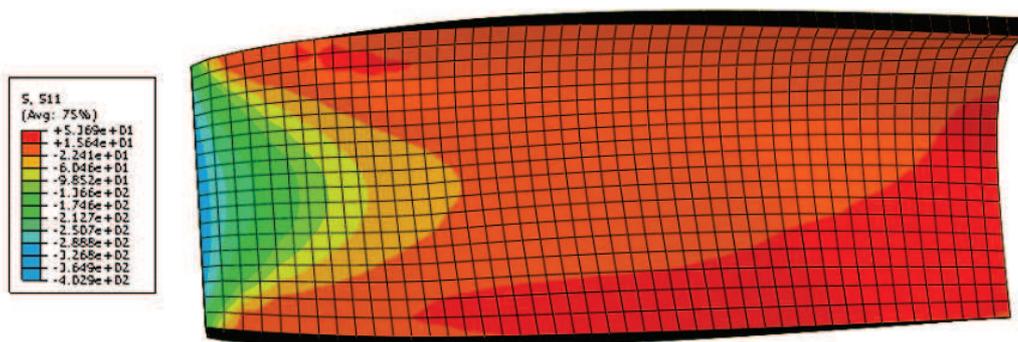


Figura 4.55: Resultados de ABAQUS. Esfuerzos  $\sigma_{xx}$  Cara Posterior con  $\Delta T = 250^{\circ}C$ .

De las Figuras 4.52, 4.53, 4.54 y 4.55 se pueden concluir algunos aspectos interesantes. En primer lugar, contrario a lo que pasaba con las placas alargadas

y cuadradas, los esfuerzos nos son uniformes en la pieza. Esto se debe principalmente a la irregularidad en la geometría de la pieza y al anclaje o sujeción de la misma. Esto hace que los esfuerzos se concentren de mayor forma cerca del anclaje y en los cambios más bruscos de geometría alcanzando valores muy altos en ciertas regiones de la pieza. Los esfuerzos  $\sigma_{xx}$  tienen valores bajos menores a  $55MPa$  mientras que los esfuerzos de Von Mises, por el otro lado, son menores a  $100MPa$  en toda la pieza a excepción de la zona de anclaje. La súbita elevación de los esfuerzos en la zona de anclaje obedece a la condiciones de borde forzadas en la simulación y durante la toma de datos. Los puntos de valores altos de esfuerzos son tan solo concentradores de esfuerzos. La distribución de esfuerzos en la sección transversal se muestra a continuación tomadas en el extremo máximo de la pieza se muestran en las Figuras

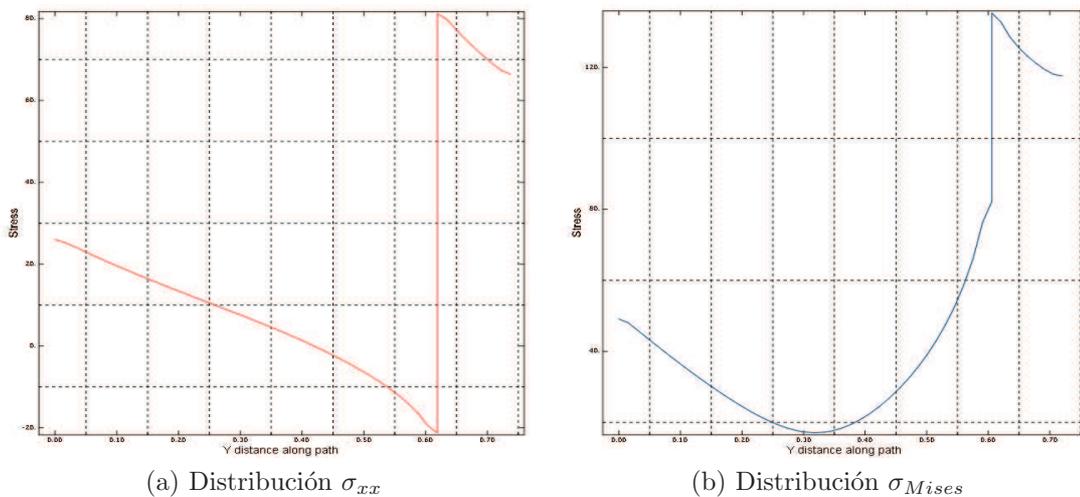


Figura 4.56: Distribución de esfuerzos en la parte más alejada de anclaje.

Los puntos tomados para el análisis de la distribución de esfuerzos en el espesor fueron aquellos de más repetibilidad a lo largo de la pieza. Se observa un comportamiento lineal esperado del modelo teórico en lo que respecta al esfuerzo  $\sigma_{xx}$ . Si se tratase de una pieza alargada y sin cambios bruscos de geometría, se esperaría una distribución de esfuerzos como la mostrada en la Figura 4.57:

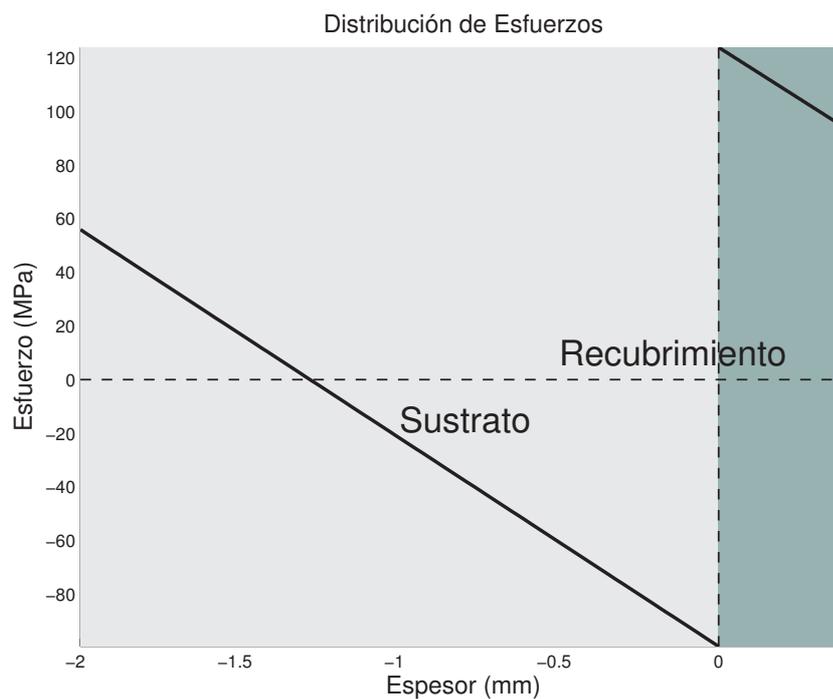
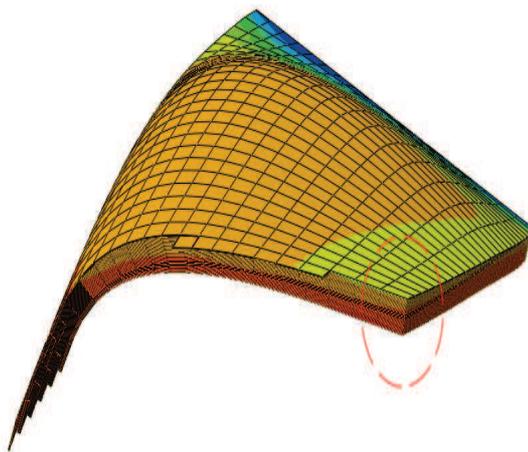
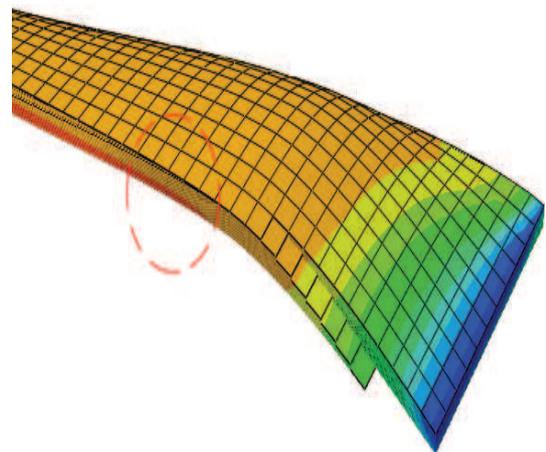


Figura 4.57: Predicción de la Distribución de Esfuerzos en el espesor de la Placa de 100MXC sobre Aluminio. Caso ideal ( $0,4mm$ ).

Haciendo una comparación entre las Figuras 4.57 y 4.56. Se observa una distribución de esfuerzos similar (misma tendencia y mismo orden de magnitud). Este comportamiento era el esperado para las regiones de la pieza sin cambios de geometría excesivos. Por otro lado, debido a que la magnitud de la distribución de esfuerzos dependerá del lugar del lugar de muestreo se realizaron varios cortes en la pieza con la intención de obtener perfiles al interior de la pieza en los lugares de mayor cambio de geometría.



Corte Longitudinal



Corte Transversal

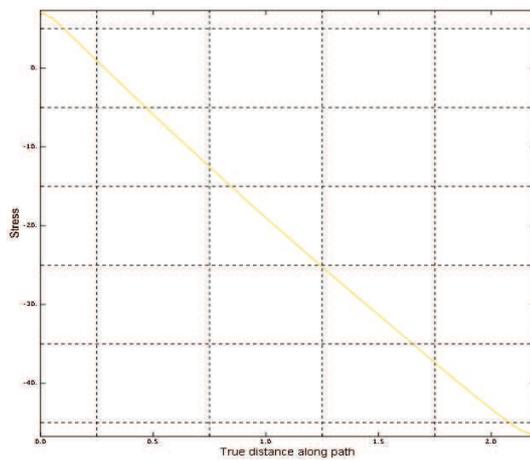
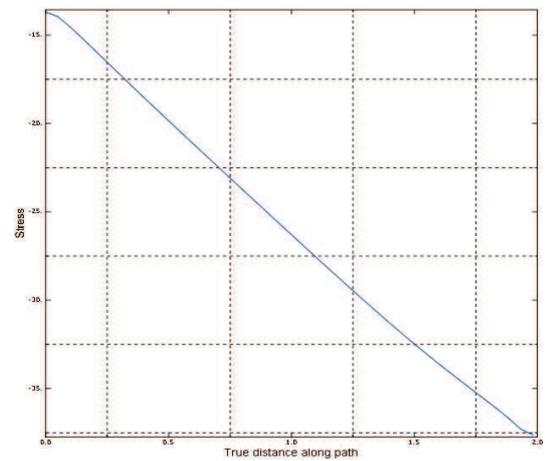
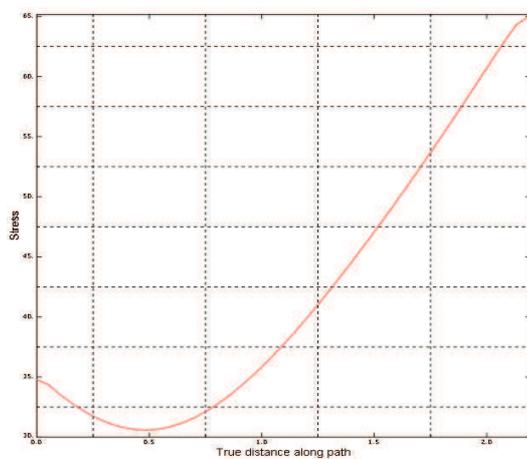
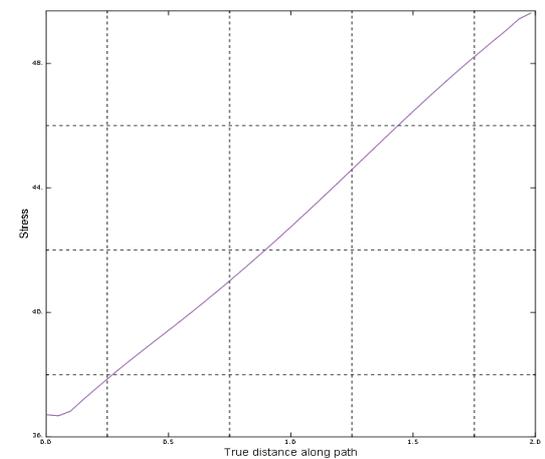
Distribución  $\sigma_{xx}$ Distribución  $\sigma_{xx}$ Distribución  $\sigma_{Mises}$ Distribución  $\sigma_{Mises}$ 

Figura 4.58: Distribución de esfuerzos al interior de la pieza.

La Figura 4.58 muestra los resultados obtenidos. Se observa cierta tendencia lineal con una composición de los esfuerzos diferente a los mostrados en la Figura 4.56. Esto sucede ya que el modelo teórico de deformación no predice efectos geométricos diversos como los que se incluyen en este caso por cambio de geometría. Aun así, las magnitudes de los esfuerzos son bajas y del mismo orden del esperado teóricamente bajo la asunción del caso ideal Figura 4.57. Así, se puede concluir que los esfuerzos obtenidos están dentro del rango esperado y mantienen en general un comportamiento predecible excepto en las regiones de cambio de geometría y de anclaje que son susceptibles a factores geométricos y de condiciones de borde.

**Recubrimiento en ambas caras P-3D** En la práctica, el recubrimiento se realiza por ambas caras de la pieza. La razón por la que no se analizó este tipo de probetas es que aplicar termorociado sobre ambas caras produce en general un efecto de reducción en la deformación y aumento en los esfuerzos. Por lo tanto, se recubrió únicamente una de las caras de las probetas con el objetivo de maximizar la deformación y favorecer el proceso de medición. Aún así, en las Figuras 4.59 y 4.60 se muestra la deformación sufrida por la probeta durante el calentamiento; las Figuras 4.61 y 4.62, por el otro lado, muestra la distribución de los esfuerzos de Von Mises mientras que las Figuras 4.63, 4.64 y 4.65 muestra la distribución de los esfuerzos principales:

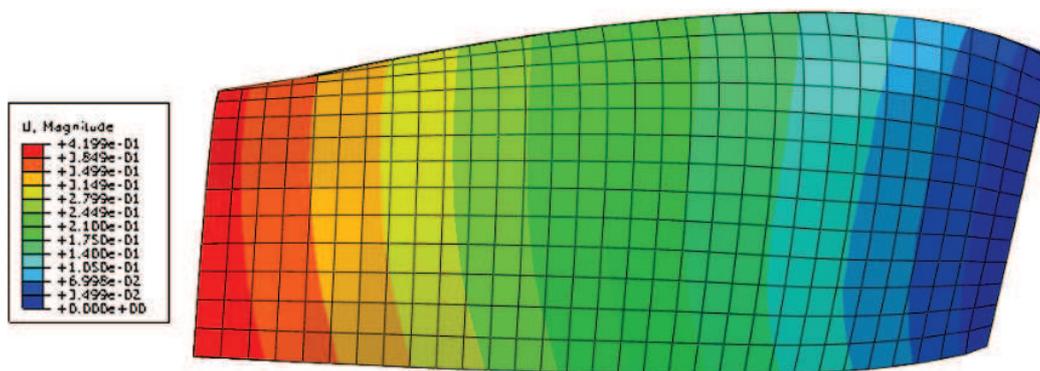


Figura 4.59: Deformaciones Absoluta en la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.

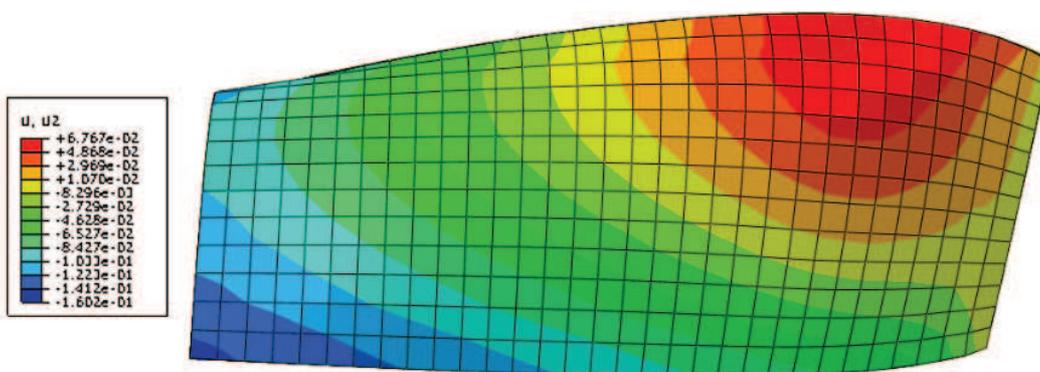


Figura 4.60: Deformaciones en el eje Y en la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.

Al comparar los valores de esfuerzo y de deformación con los valores correspondientes a la P-3D recubierta en una cara se notan diferencias significativas. En primer lugar, se nota una disminución considerable de la deformación. Con tan solo una cara recubierta, la probeta se desplaza alrededor de  $1,2mm$  mientras que recubriendo las dos caras, éste valor se reduce a  $0,4mm$ . Por otro lado, resulta evidente el cambio en la distribución de la deformación. Esto se debe a que las dos capas de recubrimiento actúan sobre el sustrato compensando el esfuerzos y modificando los patrones de deformación. La Figura 4.59 evidencia cierto comportamiento similar al de la P-2D al tener una distribución radial de la deformación lo que es consistente con el aumento de simetría en la pieza.

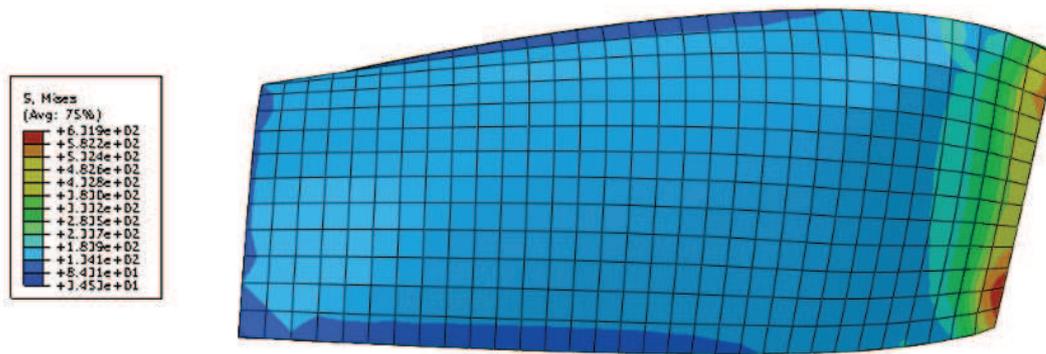


Figura 4.61: Distribución de esfuerzos de Von Mises (Vista Superior) en la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.



Figura 4.62: Distribución de esfuerzos de Von Mises (Corte Lateral) en la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.

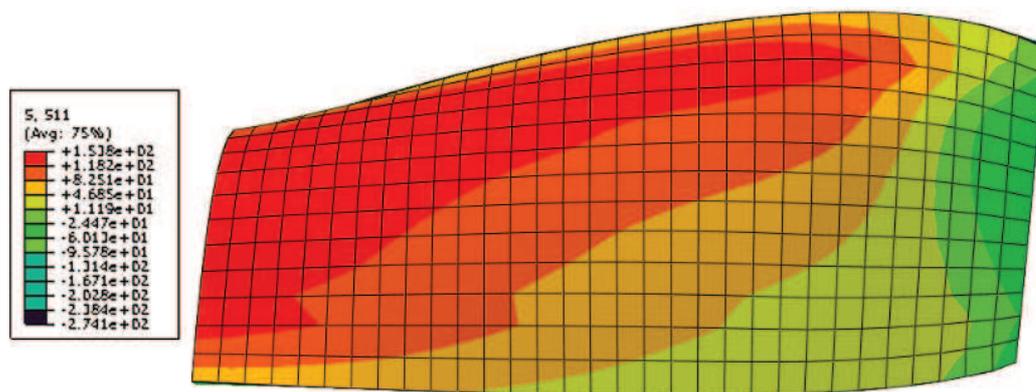


Figura 4.63: Distribución de esfuerzos de principales ( $\sigma_{11}$ ) en la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.

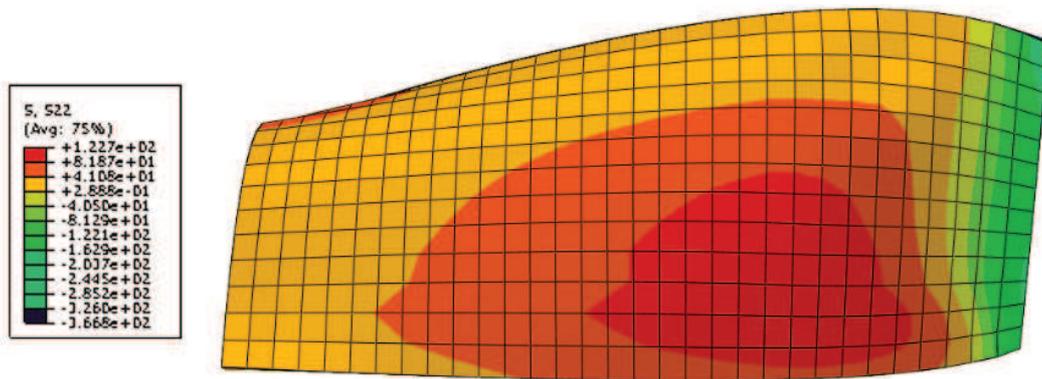


Figura 4.64: Distribución de esfuerzos de principales ( $\sigma_{22}$ ) en la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.

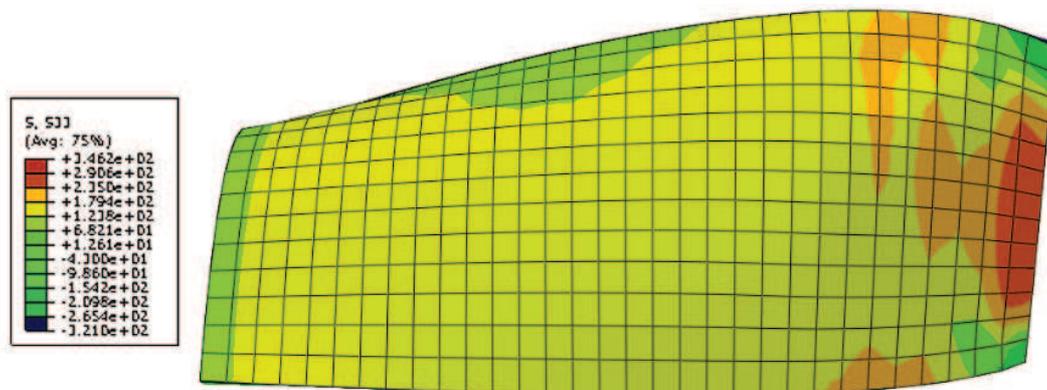


Figura 4.65: Distribución de esfuerzos de principales ( $\sigma_{33}$ ) en la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.

De las Figuras 4.61 - 4.65 se evidencia el cambio considerable en la distribución de esfuerzos principales en comparación con los esfuerzos principales de la probeta recubierta tan solo en una cara. Por otro lado, se aprecia que la distribución de esfuerzos de Von Mises luce más uniforme en toda el área. Esto lo que se puede adjudicar al dinamismo de acción de las dos capas de recubrimiento. Finalmente, el hecho más notable es el aumento superior al 200% en la magnitud de los esfuerzos. Este efecto era el esperado ya que el incluir una capa extra restringe la movilidad/deformación de la pieza pero incrementa la magnitud de los esfuerzos. Las Figuras 4.66 y 4.67 muestran los esfuerzos distribuidos en el espesor de la probeta:

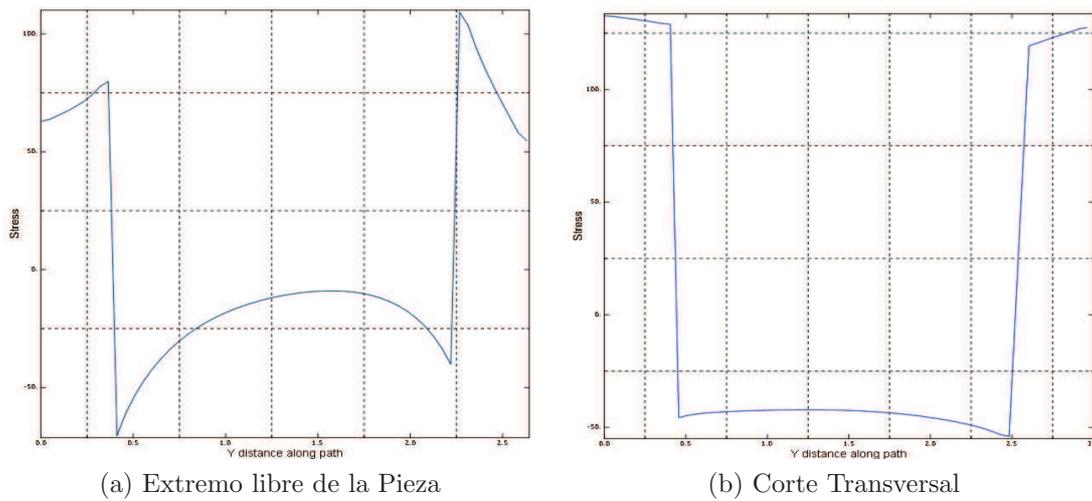


Figura 4.66: Distribución de esfuerzos de esfuerzos ( $\sigma_{11}$ ) en el espesor de la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.

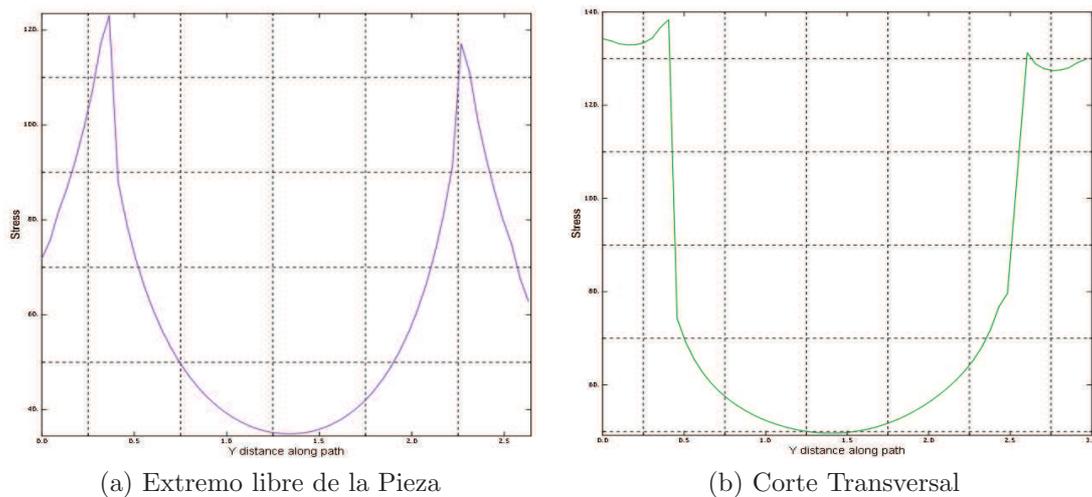


Figura 4.67: Distribución de esfuerzos de esfuerzos (Von mises) en el espesor de la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.

De las Figuras 4.66 y 4.67 se puede notar la simetría de la distribución de esfuerzos con respecto a la mitad de la pieza. Si se considera únicamente la mitad de las gráficas, se puede notar que éstas conservan la misma forma que los diagramas mostrados en las Figura 4.58. El incluir las dos capas de recubrimiento hace que se genera un distribución de esfuerzos tipo espejo (*mirror*) con respecto

a la capa de sustrato. Las magnitudes, sin embargo, por las razones mencionadas anteriormente son mucho más altas que las de la P-3D recubierta sólo una cara.

