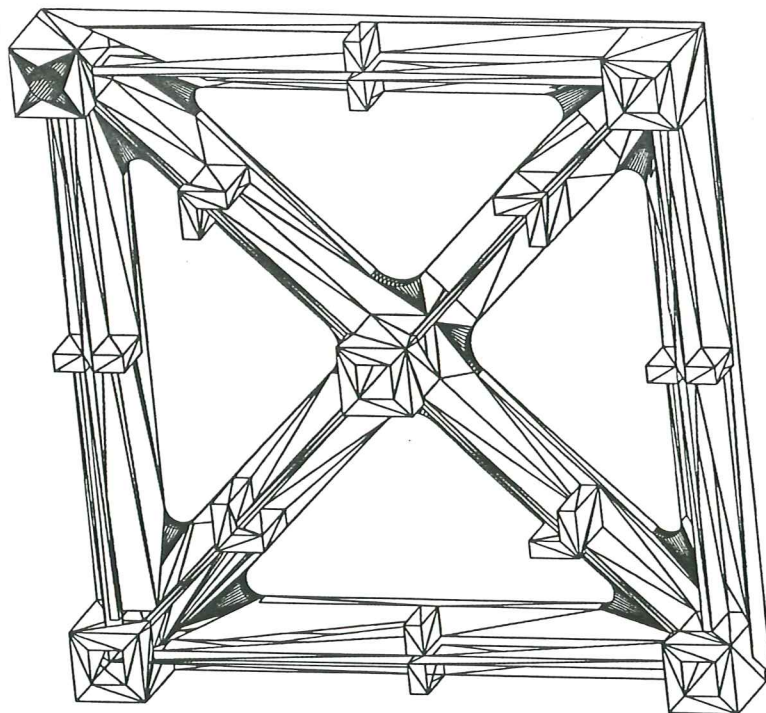


SLAP: Programa para modelado numérico de procesos de estereolitografía utilizando el método de los elementos finitos

**G. Lombera
G. Bugeda
M. Cervera
E. Oñate**



SLAP: Programa para modelado numérico de procesos de estereolitografía utilizando el método de los elementos finitos

**G. Lombera
G. Bugada
M. Cervera
E. Oñate**

Publication CIMNE Nº 47, March 1994

**Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería
Gran Capitán s/n, 08034 Barcelona, España**

ÍNDICE

	<u><i>pag.</i></u>
ÍNDICE	
RESUMEN	
1 INTRODUCCIÓN	1
2 IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA “SLAP”	7
2.1 Introducción	7
2.2 Implementación computacional	7
3 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA SLAP	13
3.1 Características del programa “SLAP”	13
3.2 Organización general de “SLAP”	13
3.3 Instrucciones para la entrada de datos	16
4 EJEMPLOS DE APLICACIÓN	21
4.1 Viga en voladizo - Análisis bidimensional	21
4.1.2 Análisis del ejemplo	24
4.1.2.1 Solución analítica para dos capas	24
4.1.2.2 Influencia de la deformación volumétrica en la distorsión por flexión	26

4.1.2.3	Influencia del Módulo de Young en la distorsión por flexión	27
4.1.2.4	Influencia del coeficiente de Poisson en la distorsión por flexión	29
4.1.2.5	Influencia del tamaño de capa en la distorsión por flexión	29
4.1.2.6	Análisis bidimensional con elementos sólidos de cuatro nodos	35
4.1.2.7	Elementos de ocho nodos y de cuatro nodos con integración selectiva	37
4.1.2.8	Análisis tridimensional	38
4.1.2.9	Influencia del poscurado	38
4.1.3	Entrada de datos	43
4.2	Pieza de test	54
	REFERENCIAS	67

RESUMEN

Dentro de todos los procesos denominados "Rapid Prototyping", se presenta en esta publicación el denominado estereolitografía. Estos procesos cuyo origen se remonta a fines de la década de los ochenta, poseen un gran interés por parte de las industrias, dado que posibilitan la fabricación de piezas en tiempos muy inferiores a los obtenidos por los métodos tradicionales y una gran versatilidad en cuanto a materiales y formas utilizadas.

Las máquinas actualmente existentes en el mercado generan de forma automática la pieza a partir de su representación geométrica en un ordenador. El modelado numérico del proceso se justifica por la necesidad de poder predecir la geometría final de la pieza con el objeto de realimentar el proceso variando los parámetros de control, con el fin de obtener la pieza deseada con la mayor precisión posible.

En esta publicación se presenta un resumen de las posibilidades del programa "SLAP" desarrollado en el CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería) para simular mediante el método de los Elementos Finitos procesos de fabricación de prototipos por estereolitografía. Asimismo se presentan las instrucciones para la utilización práctica del programa y algunos ejemplos de aplicación.

1. INTRODUCCIÓN

El reducir el "tiempo de creación" de un nuevo producto es cada vez un factor mas "estratégico" para cualquier empresa. El mercado es cada vez mas dinámico y exige mayor rapidez y seguridad para la generación de nuevos modelos.

Continuamente aparecen en el mercado nuevas tecnologías para mejorar el proceso de creación. Es normal para nosotros utilizar herramientas de CAD o digitalizar superficies; dentro de pocos años será normal obtener "piezas físicas" a partir de un modelo gráfico en 3D. Estas técnicas existen hoy en día, y ya es posible disponer de ellas; los procesos que las utilizan son denominados "Rapid Prototyping".

Estos procesos se basan en la fabricación de un objeto a partir de su representación tridimensional en un ordenador. Los datos geométricos de la pieza se utilizan para controlar un rayo láser que incide sobre una resina líquida fotosensible, produciendo el curado de la misma. De acuerdo con el proceso utilizado puede variar el material y la potencia del laser entre otros parámetros.

Las ventajas de estos procesos se fundamentan en que no requieren demasiado utillaje, los tiempos de fabricación son inferiores a los de los métodos tradicionales, y poseen una gran versatilidad en cuanto a formas.

El sistema 3D-SYSTEM, desarrollado en california, fue el primero disponible en el mercado. Actualmente ha distribuido unas 300 máquinas alrededor del Mundo.

El proceso que utiliza se denomina estereolitografía y la máquina está esquematizada en la figura 1.1. La resina líquida se coloca en un recipiente dentro del cual se encuentra un soporte móvil sobre el que se va construyendo la pieza. El extremo del soporte se debe mantener a una determinada distancia por debajo de la superficie libre de la resina. Mediante un sistema de galvanómetros con espejos (parte del tubo láser) se hace incidir el rayo láser sobre la resina produciendo el curado de la misma (solidificación). La trayectoria del rayo láser está controlada por el ordenador al cual se le introduce mediante un determinado formato CAD la geometría a construir. Existen varios formatos, dentro de los cuales el mas utilizado es el SLA, que representa superficies exteriores mediante mallas triangulares. El volumen total se secciona según diversos planos horizontales que determinan las capas que debe seguir el láser en la formación de la pieza final. Una vez producida una capa (superficie plana) el soporte desciende y la capa realizada es cubierta de resina líquida. El proceso continua hasta lograr la pieza final.

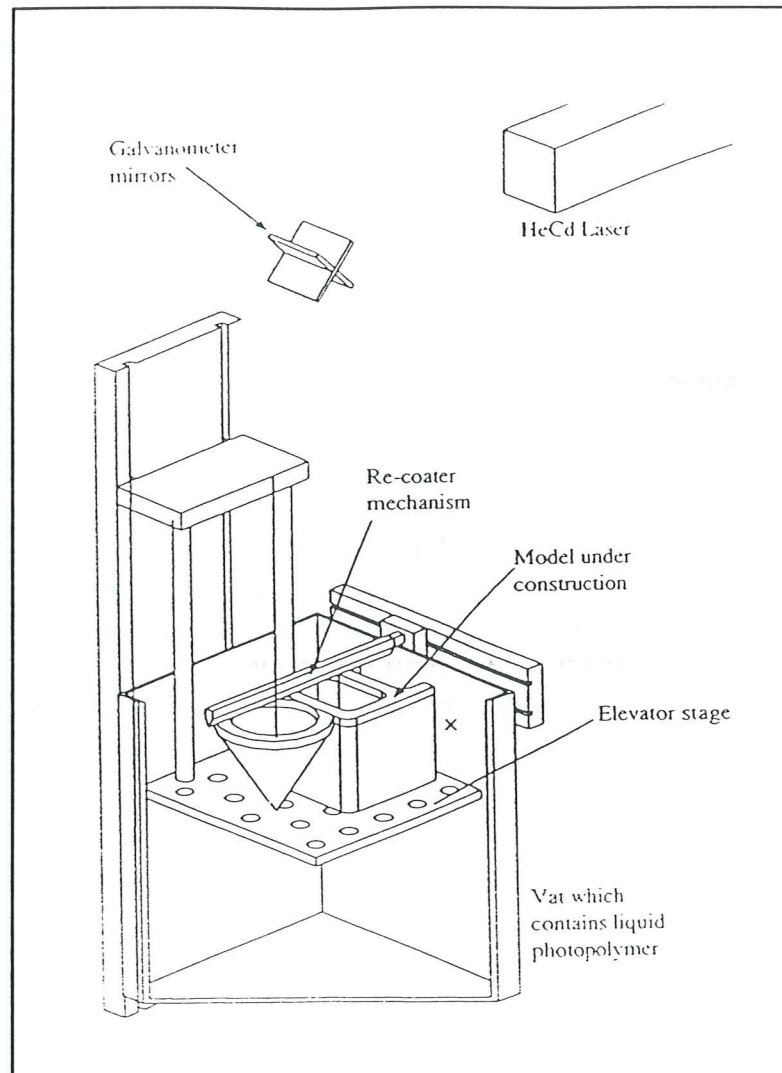


Figura 1.1 Esquema de funcionamiento de una máquina de "Estereolitografía".

Entre los distintos procesos de "Rapid prototyping" existentes en la actualidad podemos mencionar:

- 3D - SYSTEM - (California).
- STEREOS - EOS - (Alemania).
- SOUP - Solid Object UV-Laser Ploter - (Japón).
- SCS - Solid Creation System - (Japón).
- Laser Modelling - QUADRAX - (Rhode Island).
- Selective Laser Sintering - DTM Corp. - (Texas).

- Solider - Cubital - (Israel).
- Laminated Object Manufacturing - (California).
- Fused Deposition Modelling - STRATASYS - (Mineapolis).

Las diferencias entre ellos son el material utilizado, que no necesariamente es un polímero. Bajo la misma metodología anterior se pueden utilizar materiales cerámicos, materiales compuestos e incluso materiales metálicos, debiendo variar la fuente de energía necesaria, ya sea aumentando la potencia del láser o utilizando otras fuentes de energía, y el esquema de funcionamiento. No describiremos en este trabajo los distintos procesos, solo esquematizamos dos de ellos, que difieran apreciablemente del proceso de estereolitografía explicado anteriormente. Hemos seleccionado el SÓLIDER, esquematizado en la figura 1.2, y el FDM (Fused deposition modeling), esquematizado en la figura 1.3.

La selección del proceso se realiza teniendo en cuenta alguna de las siguientes características tecnológicas:

- Volumen del depósito de resina, en función del tamaño de la pieza a fabricar.
- Sistema de control del enfoque del láser. Cuando el punto a ser curado se desplaza del centro del recipiente, se cambia la distancia entre el espejo y la resina, produciendo un desenfoque. Esto causa un cambio de forma de circular a elíptica en la incidencia del rayo produciendo una pérdida de energía en el punto a ser curado.
- Velocidad de desplazamiento del láser. Esto controla la energía entregada a la resina.
- Estrategias constructivas. Cuando la resina solidifica se produce una deformación volumétrica de contracción. La causa física que origina este comportamiento será descrita en detalle más adelante, pero los diversos procesos tienen en cuenta éste fenómeno.

Una de las principales causas de discrepancia entre el modelo gráfico por ordenador y el modelo físico obtenido, es el fenómeno conocido como "curl distortion" (distorsión por flexión). Este es un tipo de distorsión que ocurre en todos los procesos de "rapid prototyping" y se debe a la contracción que experimenta una capa al solidificar. Dicha contracción produce un efecto de flexión en las capas producidas anteriormente, tal como puede verse en la figura 1.4.

En la figura 1.5 se muestra una máquina de estereolitografía de la empresa alemana EOS.

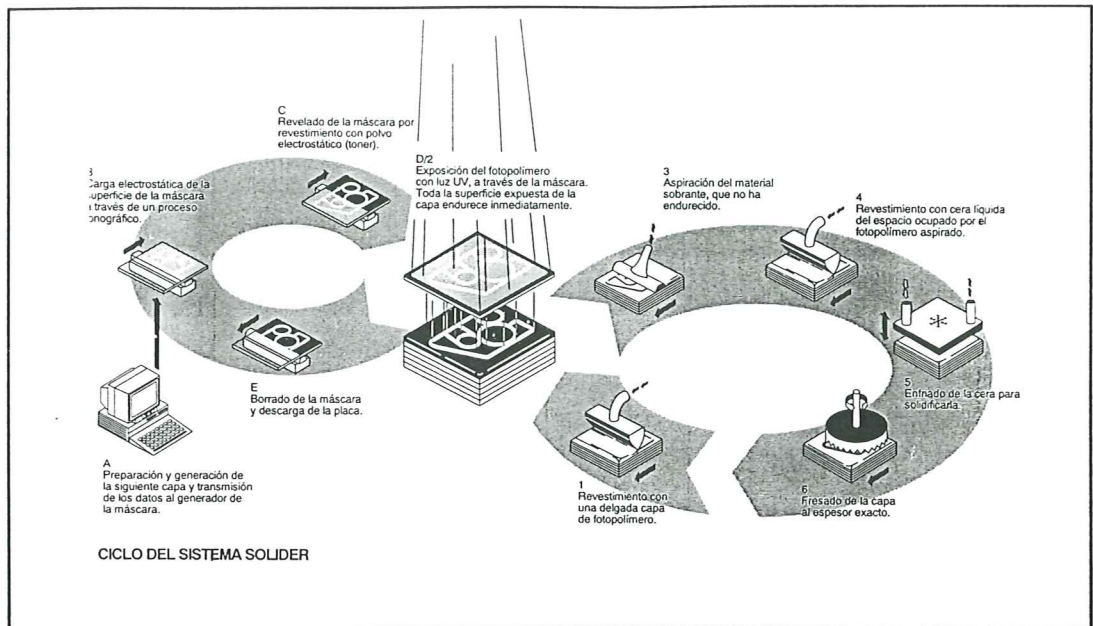


Figura 1.2 Sistema "SOLIDER".

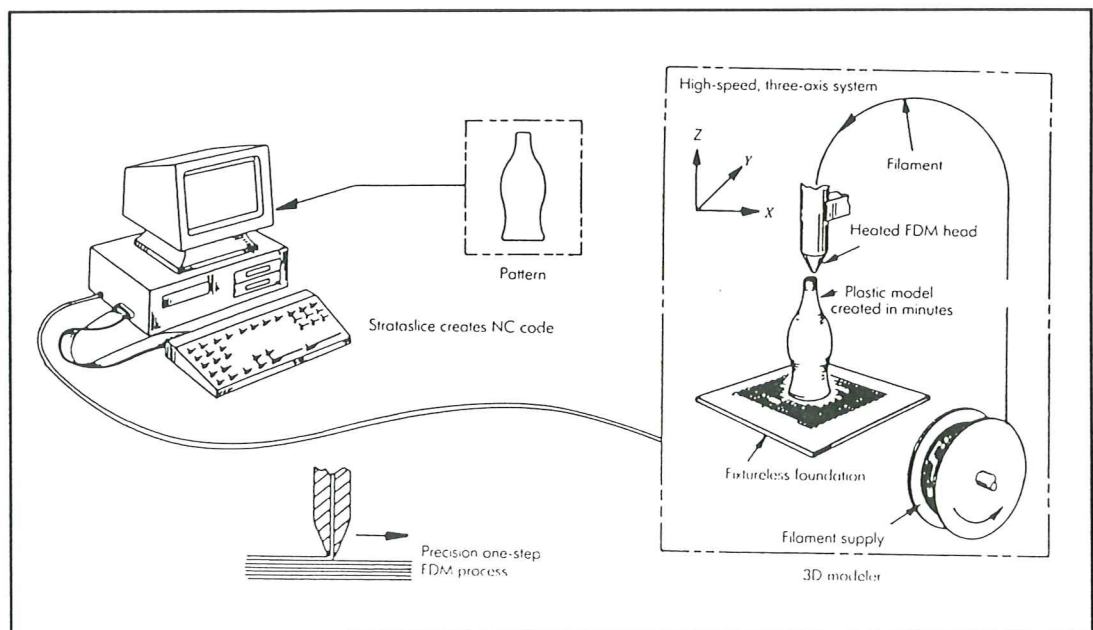


Figura 1.3 Sistema "FDM".

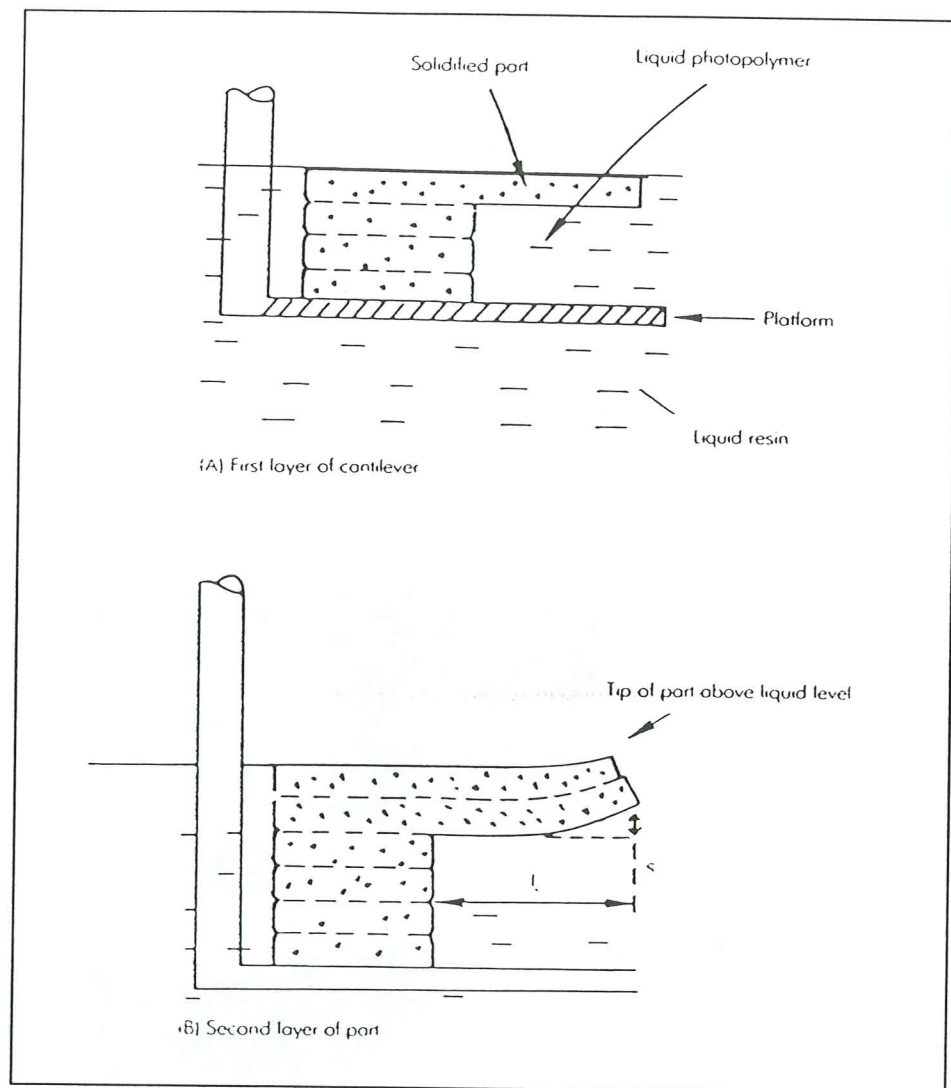


Figura 1.4 Distorsión por flexión.

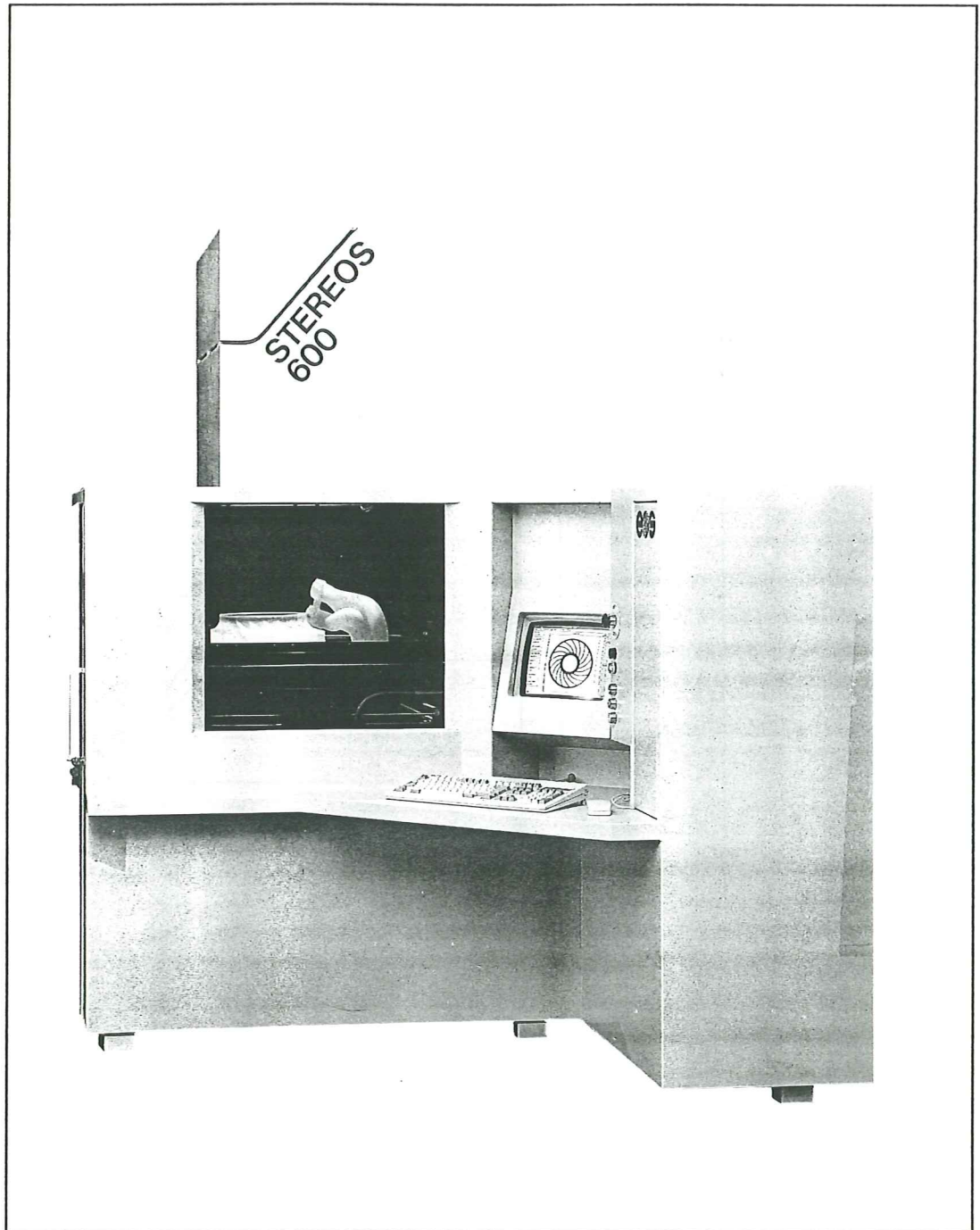


Figura 1.3 Máquina de estereolitografía.

2. IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA "SLAP"

2.1 Introducción

El Programa "SLAP" (Stereolithographi analysis program) fue implementado para simular el proceso de estereolitografía utilizando el método de los elementos finitos. En el mismo se modela el proceso constructivo por capas, el poscurado y las deformaciones finales producidas al sacar la fijación del piso luego del poscurado.

Se pueden resolver problemas bi y tridimensionales utilizando elementos cuadrangulares de cuatro y ocho nodos en 2-D y de ocho y veinte nodos en problemas 3-D.

A partir del archivo CAD y teniendo en cuenta el espesor de capa, es posible generar la malla de elementos finitos. El proceso de modelado se realiza capa a capa, teniendo en cuenta el coeficiente de contracción volumétrica. Un mayor detalle de la estructura del programa y de la entrada de datos se dan en el capítulo 3.

2.2 Implementación Computacional

Como se mencionó en la introducción, la distorsión por flexión ("Curl distortion") se debe a la contracción volumétrica que experimenta cada capa de resina al solidificar. Esta contracción produce deformaciones en el material que solidificó anteriormente. Para modelar este efecto, como los que mencionaremos en este apartado, se implementaron deformaciones iniciales en los elementos de la última capa como fuerzas debidas a deformaciones iniciales a través del cálculo de las fuerzas nodales equivalentes, calculadas (para comportamiento elastico-lineal) de la forma:

$$f_{\epsilon}^{(e)} = \int \int_{A(e)} B^T D \epsilon^o t dA$$

donde ϵ^o es la deformación volumétrica de la resina, B es la matriz de deformación del elemento, D es la matriz constitutiva y t el espesor del elemento (en problemas bidimensionales).

El vector de fuerzas debidas a deformaciones iniciales del nodo i en sólidos tridimensionales es:

$$f_{\epsilon_i}^{(e)} = \int \int \int_{V(\epsilon)} B_i^T D \epsilon^o dV$$

siendo:

$$\epsilon^o = (\epsilon_x^o, \epsilon_y^o, 0) \quad (\text{en problemas 2D})$$

$$\epsilon^o = (\epsilon_x^o, \epsilon_y^o, \epsilon_z^o, 0, 0, 0) \quad (\text{en problemas 3D})$$

Al programa se le introduce como dato inicial la geometría total del objeto a modelar discretizado por capas y el problema se resuelve capa a capa, de manera que se reproduzca el proceso real de fabricación, actualizando en cada resolución la geometría del conjunto. Esto se implementó guardando en un archivo temporal los valores de los desplazamientos nodales de cada resolución, de manera que al resolver la capa " $i+1$ ", las coordenadas de los nodos que forman las " i " capas anteriores son las actuales más los desplazamientos obtenidos en la resolución de la capa " i ". En la figura 2.1 puede verse la geometría inicial de un proceso constructivo de un rectángulo obtenido con seis capas y en la figura 2.2 el paso en que se construye la tercera capa con la actualización de la primera y segunda capa. Es de notar que la superficie superior de la última capa es siempre horizontal, coincidente con el nivel de resina líquida.

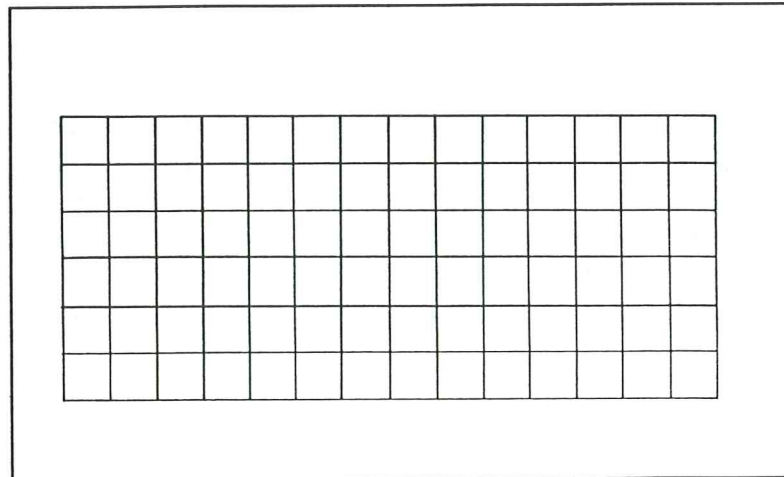


Figura 2.1 Geometría inicial de un proceso de seis capas.

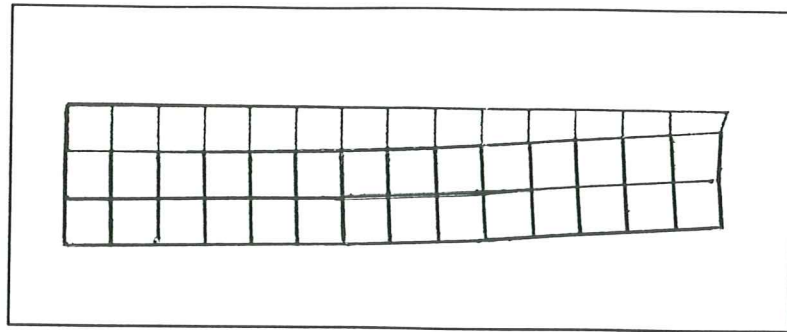


Figura 2.2 Etapa de construcción de la tercera capa.

De acuerdo al valor de deformación volumétrica de la resina en cuestión, es probable que las deformaciones sean tales que el objeto sobrepase el nivel de resina líquida, por lo que la última capa a ser curada esté por debajo de los extremos de la pieza deformada, como puede verse en la figura 2.3. Esto requiere una actualización de la geometría de la última capa que se está resolviendo. Este efecto se implementó analizando los dos casos posibles mostrados en la figura 2.4, de forma que no reproduzcan áreas negativas al introducir la geometría de la nueva capa. Puede verse en dicha figura que la cantidad de elementos y nodos iniciales se respeta, implementando elementos muy esbeltos en las zonas donde la flexión ha sido mayor.

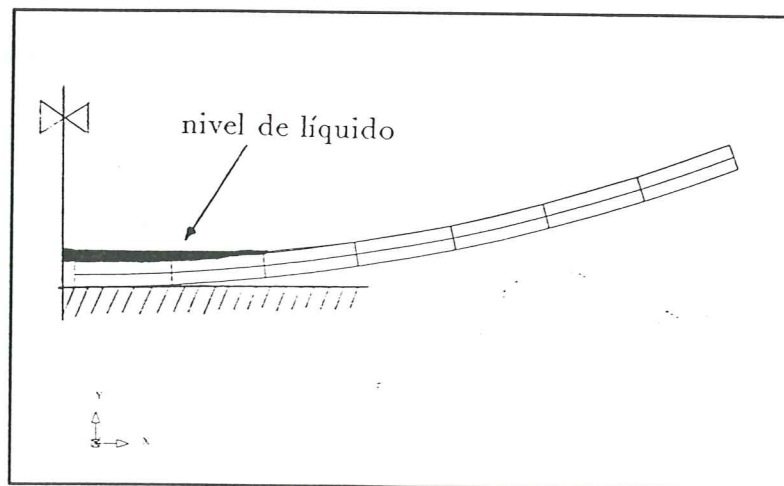


Figura 2.3 La pieza deformada sobrepasa el nivel del líquido.

El programa contempla distintos elementos: cuadriláteros de 4 y 8 nodos

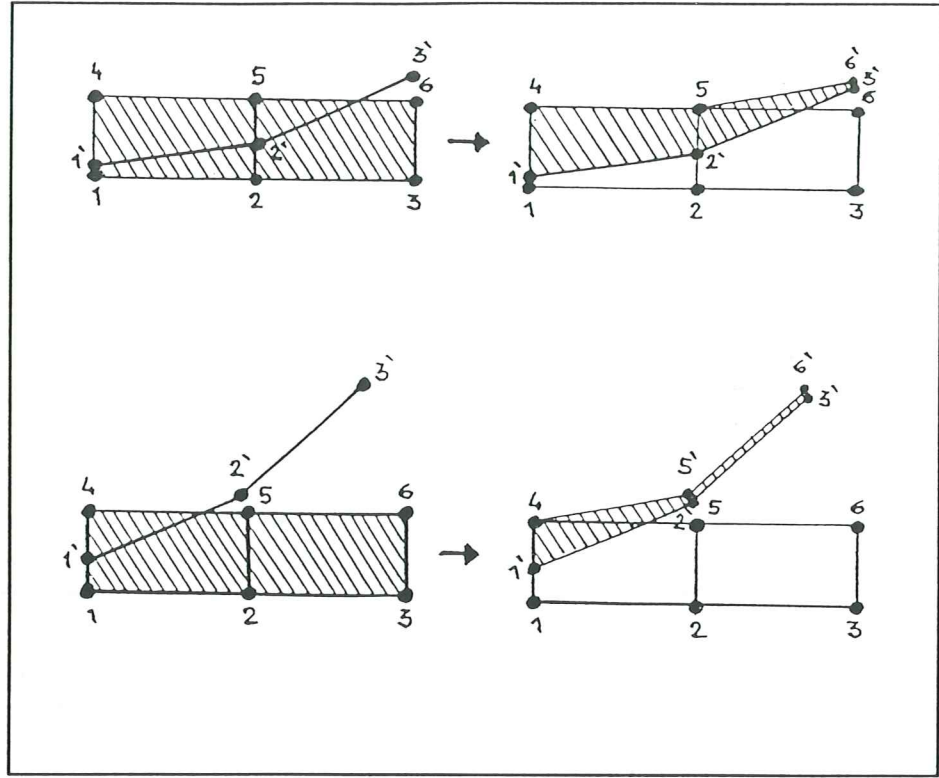


Figura 2.4 Análisis en que la deformación es tal que la pieza sobrepasa el nivel de líquido.

para análisis bidimensional y hexahédricos de 8 y 20 nodos para análisis tridimensional. Los elementos de cuatro nodos en 2D y los de 8 nodos en 3D, no proporcionan buenos resultados a flexión, por lo que se ha implementado una integración selectiva que mejora notablemente los resultados [2]. La técnica utilizada para eliminar el exceso de deformación tangencial intrínseco del elemento es evaluar los términos correspondientes a dichas deformaciones con una cuadratura de Gauss-Legendre de un solo punto. Para ello se divide la matriz de rigidez en la suma de una matriz que contiene los términos volumétricos K_v y otra que contiene los términos de deformación tangencial K_t . Así, para el caso bidimensional:

$$K^{(e)} = K_v^{(e)} + K_t^{(e)}$$

con:

$$K_{v_{ij}}^{(e)} = \int \int_{A^{(e)}} B_{v_i}^T D_v B_{v_j} t dA ; K_{t_{ij}}^{(e)} = \int \int_{A^{(e)}} B_{t_i}^T D_t B_{t_j} t dA$$

siendo

$$B_{v_i} = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{pmatrix} ; \quad B_{t_i} = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{pmatrix}$$

$$D_v = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{12} & d_{22} \end{pmatrix} ; \quad D_t = (d_{33})$$

La matriz K_v se calcula con una cuadratura de 2X2 puntos, mientras que K_t se obtiene utilizando una cuadratura reducida de un solo punto, lo que implica simplemente evaluar el integrando en el centroide del elemento. En el caso de sólidos tridimensionales se realiza el mismo esquema de descomposición de la matriz de rigidez, con las matrices B y D para tres dimensiones.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA “SLAP”

3.1 Características del programa *SLAP*

En los apartados siguientes se presenta la descripción del programa *SLAP* para modelado de piezas obtenidas por el proceso de estereolitografía por el Método de Elementos Finitos. La versión de *SLAP* que se presenta en este trabajo está escrita en FORTRAN V y tiene las siguientes características generales:

Tipologías de estructuras abordables

- Estructuras en tensión plana
- Estructuras en deformación plana
- Sólidos tridimensionales

Características del material

- Material elástico lineal isótropo.

Elementos utilizables

Para el análisis de cada tipología estructural pueden utilizarse los elementos isoparamétricos siguientes:

<u>Tipología</u>	<u>Elemento</u>
<i>Tensión y deformación plana</i>	<ul style="list-style-type: none">- Elementos cuadriláteros lagrangianos de 4 y 9 nodos- Elemento cuadrilátero serendípito de 8 nodos
<i>Sólidos tridimensionales</i>	<ul style="list-style-type: none">- Elementos hexagonales de 8 y 20 nodos

3.2 Organización general de *SLAP*

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo principal del programa *SLAP*. Para centrar conceptos definiremos seguidamente las etapas

fundamentales asociadas al análisis de una estructura por un programa de elementos finitos, así como la relación de cada etapa con las subrutinas del diagrama de la Figura 3.1.

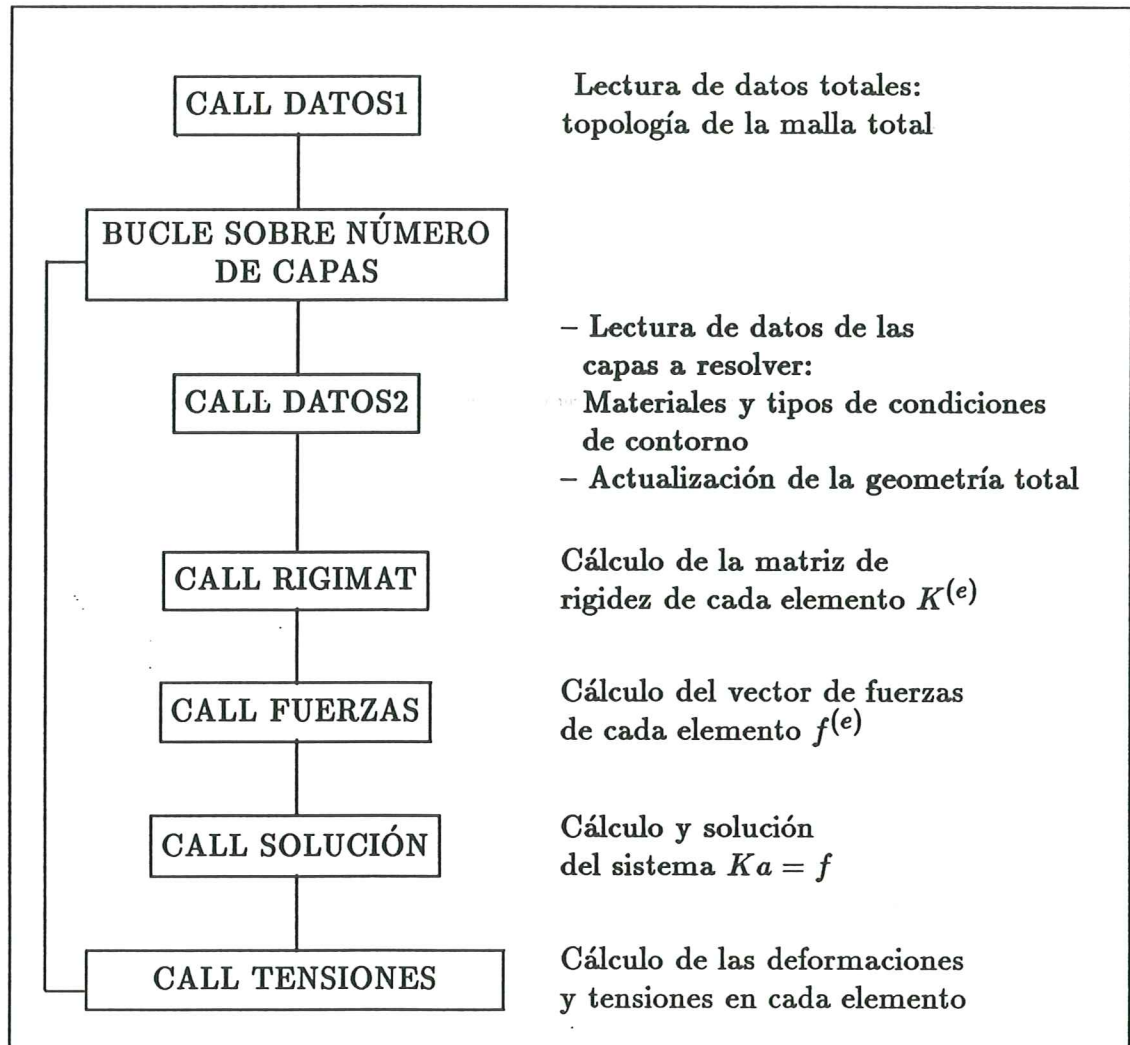


Figura 3.1 Diagrama de flujo del programa *SLAP*.

Etapas 1: Selección del elemento

La elección del elemento es función de la tipología de la estructura y de la precisión buscada. Una vez escogido el elemento quedan definidas sus funciones de forma. Cabe recordar que cuando el problema es fuertemente

de flexión se cuenta con la posibilidad de la integración selectiva, que se describió anteriormente.

Etapas 2: Discretización de la estructura en elementos finitos

Esta etapa puede representar un porcentaje alto del esfuerzo total de cálculo si la geometría de la estructura es compleja. En ella hay que definir perfectamente la topología de la malla (que de nuevo depende de la geometría de la estructura y la precisión buscada), las coordenadas de los nodos, las propiedades del material de cada elemento y las condiciones de contorno. Esta etapa se denomina generalmente *preproceso* y puede automatizarse en gran manera si se dispone de los programas de generación de malla adecuados. En nuestro caso se parte de la geometría del CAD y por medio de una interface construida para tal efecto se construye la malla de elementos finitos necesaria.

Es importante destacar que el coste de la solución del sistema de ecuaciones global depende en gran manera de: a) la numeración de los nodos de la malla (ejemplo: si se utiliza el método de eliminación de Gauss), o b) la numeración de los elementos (ejemplo: si se utiliza el método frontal). Conviene, por tanto, cuidar la topología de la malla y adecuarla en lo posible al método de solución de ecuaciones utilizado. Para ello dentro del programa SLAP, puede hacerse uso de técnicas especiales de optimización de la numeración de nodos.

Etapas 3: Entrada de datos (Subrutina DATOS)

Esta etapa consiste en la lectura por el ordenador de los datos generados en la etapa de discretización. Dicha lectura se efectúa en dos partes; En la primera, al comienzo del programa, se leen los datos de la malla total, y luego, en la subrutina **DATOS**, los datos correspondientes a las capas a resolver. En esta subrutina, se realiza la actualización de la geometría total, en función de los desplazamientos obtenidos al resolver la capa anterior, como fue explicado anteriormente.

Etapas 4: Cálculo de la matriz de rigidez de los elementos (Subrutina RIGIMAT)

En la etapa siguiente se calculan las matrices de rigidez $K^{(e)}$ de cada uno de los elementos de la malla. Dicho cálculo se efectúa en la subrutina **RIGIMAT** y su mayor o menor complejidad depende del tipo de elemento utilizado. En esta rutina está implementada la integración selectiva en los elementos de cuatro nodos en 2-D y de 8 nodos en 3-D.

Etapas 5: Cálculo del vector de fuerzas nodales (Subrutina FUERZAS)

La siguiente etapa es el cálculo del vector de fuerzas nodales equivalentes $f^{(e)}$ para cada elemento y se efectúa en la subrutina **FUERZAS**. Las fuerzas nodales equivalentes durante el proceso constructivo están aplicadas en los

elementos correspondientes a la última capa. Las mismas son producidas por la contracción volumétrica del material. En el proceso del poscurado, toda la estructura se encuentra sometida a una contracción uniforme, lo que hace que las fuerzas nodales equivalentes se apliquen a todos los elementos.

Etapas 6: Solución del sistema de ecuaciones global (Subrutina SOLUCION)

Conocidas las matrices de rigidez y los vectores de fuerzas nodales de cada elemento la etapa siguiente es el ensamblaje de dichas matrices y vectores en la ecuación de equilibrio global $Ka = f$, y su solución para obtener los movimientos nodales a . Este proceso se efectúa en la subrutina **SOLUCION** y para el mismo puede utilizarse toda una variedad de técnicas de cálculo numérico perfectamente desarrolladas.

Etapas 7: Cálculo de deformaciones y tensiones (Subrutina TENSIONES)

La etapa final consiste en calcular las deformaciones y tensiones en los diferentes elementos a partir de los valores de los movimientos nodales. Dicho cálculo se lleva a cabo en la subrutina **TENSIONES**. Esta etapa de postproceso va también asociada en la práctica a la representación gráfica de los resultados del cálculo (desplazamientos, deformaciones y tensiones). La programación del postproceso no es un problema trivial, fundamentalmente en problemas tridimensionales, siendo necesario un conocimiento profundo de técnicas de dibujo por ordenador. No obstante, generalmente puede hacerse uso de programas comerciales "ad hoc" y el problema se reduce a compatibilizar los formatos de resultados del cálculo con los necesarios para su representación gráfica. La versión 1/93 de **SLAP** para ordenador PC compatible incluye software para representación gráfica de datos y resultados compatibles con las subrutinas gráficas de MICROSOFT 5.0.

3.3 Instrucciones para la entrada de datos del programa "SLAP"

Las instrucciones se han agrupado en "tarjetas" formateadas. Cada "grupo de tarjetas" incluye un conjunto de datos similares; ejemplo: coordenadas nodales, cargas puntuales, etc.

GRUPO DE TARJETAS 1. NUMERO DE PROBLEMAS Y TITULO DE CADA PROBLEMA

Tarjeta 1.1	I5	NPROB	Número de problemas a analizar
Tarjeta 1.2	A80	TITULO	Título de cada problema

NOTA: Tantas tarjetas 1.2 como número de problemas a analizar.

GRUPO DE TARJETAS 2.**PARAMETROS GRAFICOS Y DE RESOLUCION**

Tarjeta 2.1	I5	MCAPA	Número total de capas
		NCAPA	Número de capas a resolver
		NGRAF	Frecuencia de capas a graficar
		IREDU	Integración reducida
		=1	Utiliza integración reducida
		IRENU	Renumerador
		=1	Utiliza renumerador

GRUPO DE TARJETAS 3.**PARAMETROS DE CONTROL**

Tarjeta 3.1	15I5	NPNOD	Número de puntos nodales totales
		NELEM	Número de elementos totales
		NPRES	Número de nodos totales con movimiento prescrito
		NCARG	Número de casos de carga
		NTIPO	Tipo de problema
		=1	Tensión plana
		=2	Deformación plana
		=4	Sólidos tridimensionales
		NNODE	Número de nodos por elemento
		NGDLN	Número de grados de libertad
		NMATS	Número de materiales
		NPROP	Número de propiedades
		NGAUS	Número de puntos de Gauss
		NDIME	Número de dimensiones
		NTENS	Número de tensiones
		INDSO	Tipo de solver
		=1	Método de Gauss
		=2	Método de frontal
		=3	Skayland
			Iterativos
		=4	Jacobi
		=5	Gauss Seidel
		=6	Gradientes conjugados
			Iterativos para Skayland
		=7	Jacobi
		=8	Gauss Seidel
		=9	Gradientes conjugados
		IWRIT	Indicador para escritura de datos
		=1	Escribe datos en fichero de resultados
	2f10.3	DEF01	Coefficiente de contracción del proceso constructivo
		DEF02	Coefficiente de contracción del poscurado

GRUPO DE TARJETAS 4.**CONECTIVIDADES NODALES DE CADA ELEMENTO**

Tarjeta 4.1	13I5	NUMEL	Número de elementos totales
		MATNU(NUMEL)	Tipo de material en cada elemento
		LNODS(NUMEL, INODE)	Conectividades (bucle sobre NNODE)
			Continúan conectividades (en elementos 3D)
Tarjeta 4.2	13I5		

NOTAS:

- Tantas tarjetas 4.1 como número de elementos (NELEM)
- La tarjeta 4.2 se utilizará solamente para NNODE=20

GRUPO DE TARJETAS 5.

COORDENADAS NODALES

Tarjeta 5.1	I5,3F10.0	IPNOD	Número de nodo
		COORD(IPNOD,1)	Coordenada X del nodo
		COORD(IPNOD,2)	Coordenada Y del nodo (en 2D)
		COORD(IPNOD,3)	Coordenada Z del nodo (en 3D)

NOTA: Tantas tarjetas 5.1 como número de nodos totales (NPNOD).

GRUPO DE TARJETAS 6. PARAMETROS DE CONTROL
POR CAPA

Tarjeta 6.1	I5	NPRESC	Nodos restringidos en la capa
Tarjeta 6.2	F10.5	DELTAZ	Espesor de capa

GRUPO DE TARJETAS 7.

MOVIMIENTOS PRESCRITOS

Tarjeta 7.1	I5	NTCOND	Cantidad de tipos de condiciones
Tarjeta 7.2	I5	ITICON	Número de la coordenada a fijar
			=1 Coordenada x
			=2 Coordenada y
			=3 Coordenada z
Tarjeta 7.3	F10.5	IVCOR	Valor fijado para ITICON
	3I1	INPRE	Código de movimiento prescrito
			=0 Movimiento libre
			=1 Movimiento prescrito
	3F10.5	PRESC	Valor del movimiento prescrito

NOTAS:

- Tantas tarjetas 7.2 y 7.3 como cantidad de tipos de condiciones(NTCOND)
- Dentro del lazo anterior, tantas tarjetas 7.3 como grados de libertad.

GRUPO DE TARJETAS 8. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Tarjeta 8.1 I5,4E15.5

NUMAT	NUMERO DE MATERIAL
PROPS(NUMAT, IPROP)	Propiedades del material
PROPS(NUMAT, 1)	=1 Módulo de Young
PROPS(NUMAT, 2)	=2 Coeficiente de Poisson
PROPS(NUMAT, 3)	=3 Espesor
PROPS(NUMAT, 4)	=4 Peso específico

NOTA: Tantas tarjetas 8.1 como número de materiales diferentes (NUMAT).

GRUPO DE TARJETAS 9. PARAMETROS DEL ESTADO DE CARGAS

Tarjeta 9.1 A20

TITULO	Titulo del estado de carga
--------	----------------------------

Tarjeta 9.2 4I5

ISFIJ	Indicador de carga puntual
ICONT	Indicador de contracción volumétrica

NOTAS:

- Tantas tarjetas 9.1 y 9.2 como número de estados de carga (NCARG).
- ISFIJ = 1 significa que no tengo fijación al suelo.
- ICONT = 1 significa que estoy en el proceso constructivo.

GRUPO DE TARJETAS 10. FICHERO DEL POSPROCESO

Tarjeta 10.1 A20 NOMBRE Nombre del fichero de posproceso

NOTA : Esta tarjeta va en las capas correspondientes segun NGRAF.

NOTA GENERAL.

Tantas tarjetas 7,8,9 y 10 como capas a resolver.

4. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

4.1 Viga en voladizo - Análisis bidimensional

Se analizó el test extraído de la referencia [3] que se esquematiza en la figura 4.1.1. El mismo consiste en unos voladizos gemelos ("twin Cantilever")

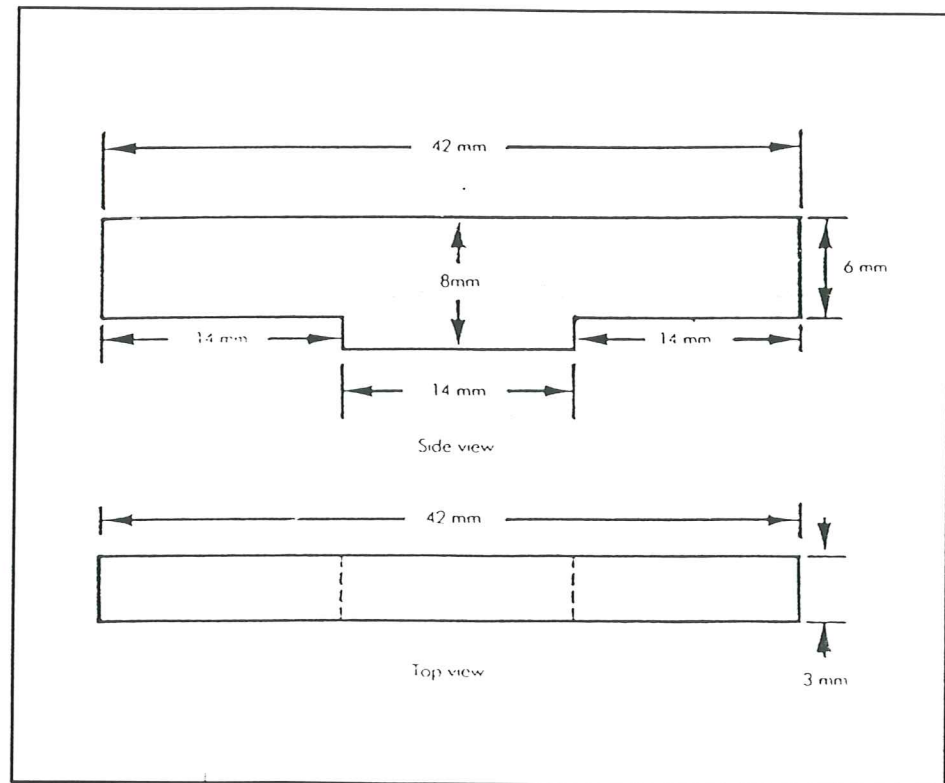


Figura 4.1.1 Geometría utilizada para el test.

fabricados con el proceso de estereolitografía en 24 capas de 0.25 mm de espesor. Se mide con este test el factor de distorsión por flexión ("Curl Factor") cuya expresión es:

$$C_{f6} = \frac{(M_6 - M_0)}{6mm} * 100$$

donde M_0 es la elevación en milímetros del origen de la base del voladizo y M_6 es la elevación en milímetros de la parte inferior de la viga medida a 6

milímetros del origen de la base. La figura 4.1.2 muestra los resultados dados en la bibliografía para este test cuando se utiliza una resina comercial XB 5139.

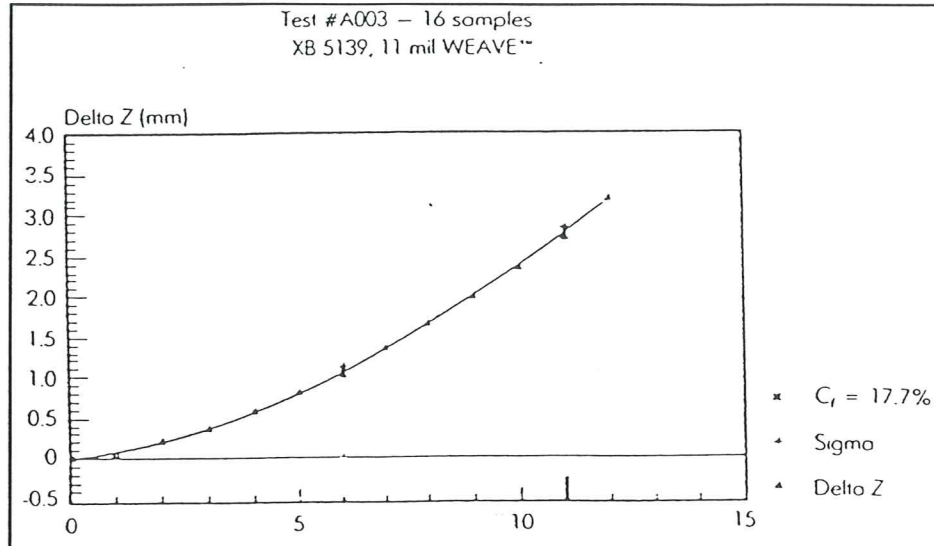


Figura 4.1.2 Valores de Delta Z ($M_6 - M_0$) dados en la referencia [3]

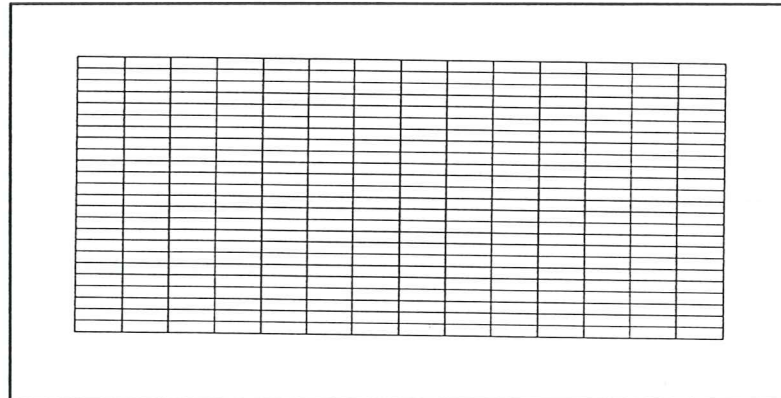


Figura 4.1.3 Malla utilizada.

Los resultados que se muestran corresponden a un análisis realizado con elementos cuadrangulares de cuatro nodos con integración selectiva. En el apartado 4.1.3 se da la entrada de datos correspondientes, y en los

subapartados 4.1.2.1 a 4.1.2.9 ,se ha realizado un análisis de la influencia de diversos parámetros geométricos y mecánicos en el “Curl Distortions”.

En la figura 4.1.3 se muestra la malla utilizada, y la figura 4.1.4 las pieza final. En la figura 4.1.5 se compara la curva de variación de los Delta Z de la referencia con la obtenida en nuestro análisis.

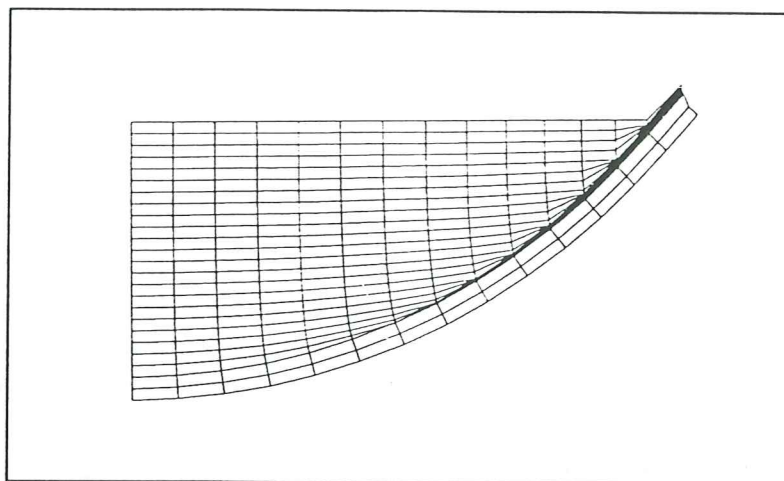


Figura 4.1.4 Pieza resultante

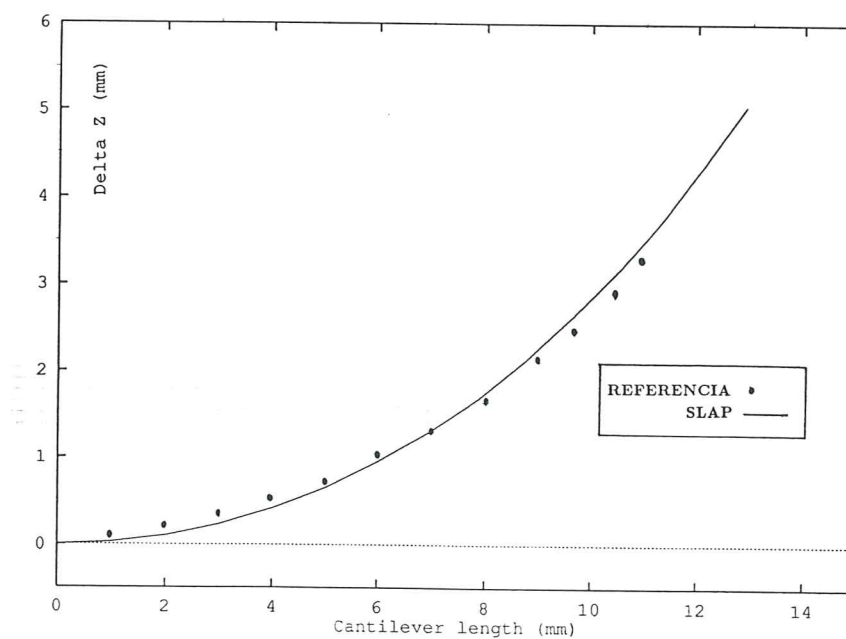


Figura 4.1.5 Comparación de resultados

4.1.2 Análisis del ejemplo

Se detalla a continuación un estudio de la influencia en el factor de distorsión por flexión de distintos parámetros. Estos son:

- Parámetros del Material: Deformación volumétrica, Módulo de Young y Coeficiente de Poisson.
- Parámetros constructivos: Espesor de capa.
- Parámetros del modelado numérico: Análisis bidimensional con elementos de cuatro y ocho nodos y tridimensional con elementos hexahédricos de 8 y 20 nodos. Comparación de elementos sólidos de cuatro nodos con y sin integración selectiva, de ocho nodos.

4.1.2.1 Solución analítica para dos capas

Utilizando la teoría de Resistencia de Materiales, es posible encontrar una solución analítica para dos capas, asumiendo una contracción inicial en la capa superior de valor ϵ_0 . De esta manera, las deformaciones iniciales de las capas serán:

$$\epsilon_0^1 = \epsilon_0 \quad y \quad \epsilon_0^2 = 0$$

De esta forma se pretende encontrar los valores de deformaciones y tensiones que este estado de sollicitación produce en la pieza. Ver figura 4.6.

Bajo la hipótesis de Bernoulli-Navier de deformación plana de la sección de la pieza, la distribución final de deformaciones está dada por la ley lineal:

$$\epsilon = \epsilon_f - y \frac{1}{\rho}$$

siendo la curvatura

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\varphi}{ds}$$

Las distribuciones de las tensiones en cada una de las capas serán también lineales y de valor:

$$\sigma_1 = E(\epsilon - \epsilon_0^1) = E(-\epsilon_f - \frac{y}{\rho} + \epsilon_0) = E(\epsilon_0 - \epsilon_f - \frac{y}{\rho})$$

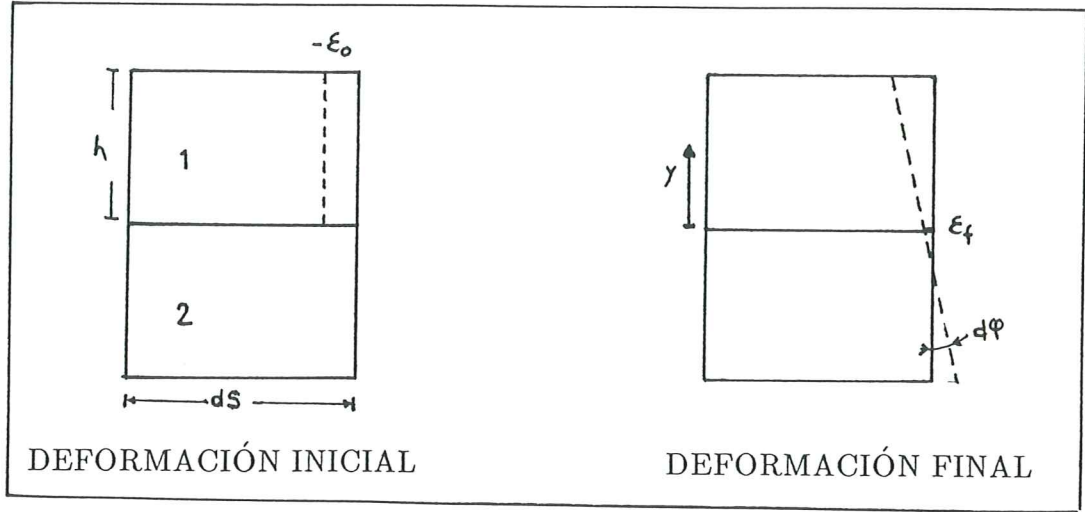


Figura 4.6 Esquema de la deformación inicial y final

$$\sigma_2 = E(\epsilon - \epsilon_o^2) = E(-\epsilon_f - \frac{y}{\rho}) = E(-\epsilon_f - \frac{y}{\rho})$$

Las ecuaciones de equilibrio interno de las secciones son:

$$N = 0 = \int_A \sigma dA \quad (1) \quad M = 0 = \int_A \sigma y dA \quad (2)$$

De la ecuación (1):

$$\begin{aligned} \int_A \sigma dA &= \int_{y=0}^{y=h} E(\epsilon_o - \epsilon_f - \frac{y}{\rho}) b dy + \int_{y=-h}^{y=0} E(-\epsilon_f - \frac{y}{\rho}) b dy \\ &= Eb(\epsilon_o h - \epsilon_f 2h) = 0 \implies \epsilon_f = \frac{\epsilon_o}{2} \end{aligned}$$

donde b es el ancho de la pieza

De la ecuación (2):

$$\begin{aligned} \int_A \sigma y dA &= \int_{y=0}^{y=h} E(\epsilon_o - \epsilon_f - \frac{y}{\rho}) b y dy + \int_{y=-h}^{y=0} E(-\epsilon_f - \frac{y}{\rho}) b y dy \\ &= Eb(\epsilon_o \frac{h^2}{2} - \frac{2}{3} \frac{h^3}{\rho}) = 0 \implies \frac{1}{2} \epsilon_o = \frac{2}{3} \frac{h}{\rho} \implies \frac{1}{\rho} = \frac{3}{4} \frac{\epsilon_o}{h} \end{aligned}$$

Por lo tanto, las deformaciones de las fibras superior e inferior son:

$$\epsilon^s = -\epsilon_f - h \frac{1}{\rho} = -\frac{\epsilon_o}{2} - \frac{3}{4} \epsilon_o = -\frac{5}{4} \epsilon_o$$

$$\epsilon^i = -\epsilon_f + h \frac{1}{\rho} = -\frac{\epsilon_o}{2} + \frac{3}{4} \epsilon_o = \frac{1}{4} \epsilon_o$$

4.1.2.2 Influencia de la deformación volumétrica en la distorsión por flexión

En la figura 4.7 se muestra la reproducción del test obtenido de la referencia [3] y que fue descrito anteriormente. Se utilizó para el modelado elementos cuadrangulares de 8 nodos con cuatro puntos de Gauss por elemento. En la gráfica se presentan los estados correspondientes a la construcción de las capas 3, 9, 18 y 24.

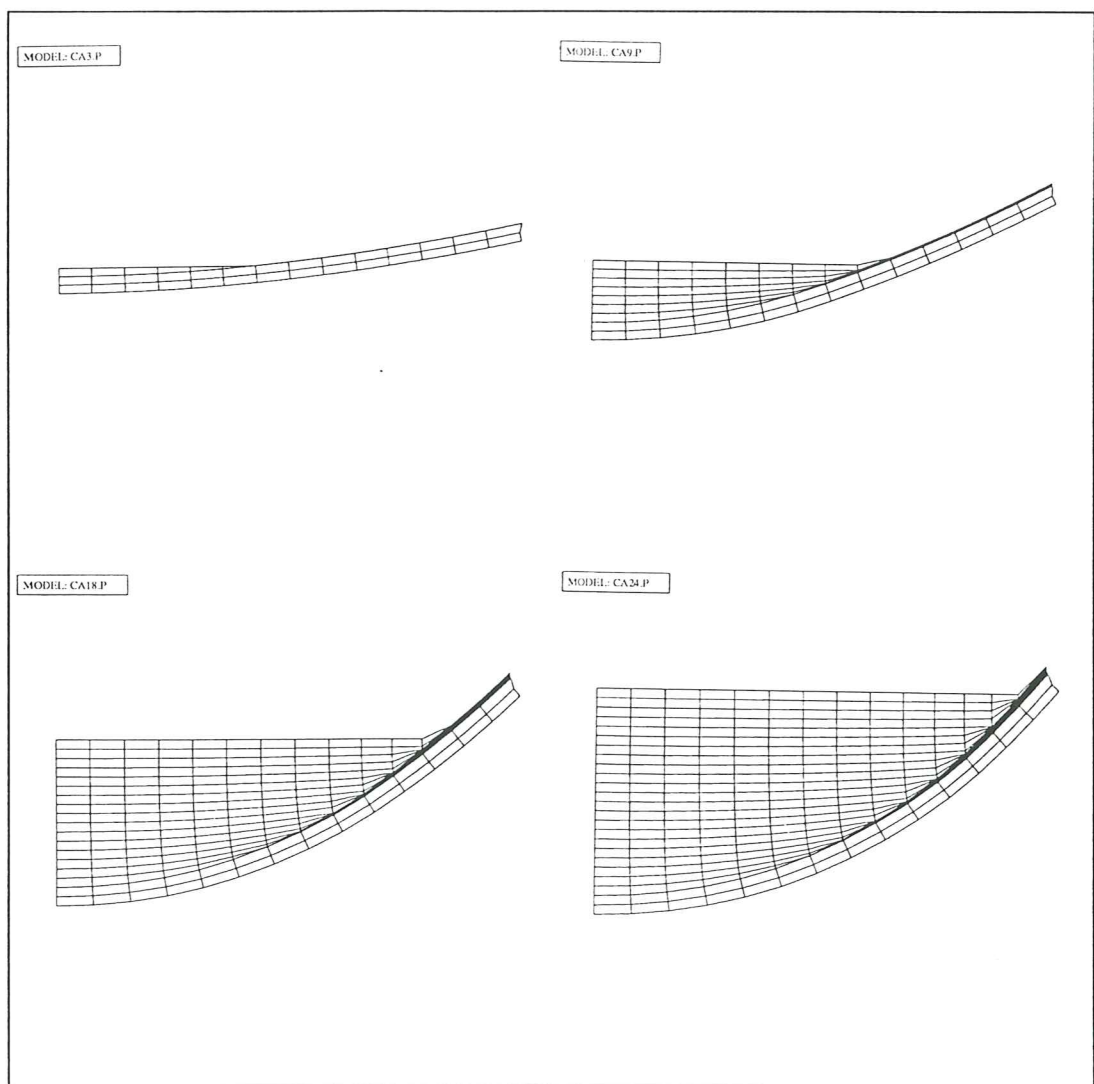


Figura 4.7 Proceso constructivo de las capas 3, 9, 18 y 24

En la figura 4.8 se muestran curvas de Delta Z ($M_6 - M_0$) en función de la longitud del voladizo, para distintos valores de la deformación volumétrica. Para la determinación del factor de distorsión por flexión, como se mencionó anteriormente, se utiliza la medida correspondiente a la elevación en milímetros de la base del voladizo, medida a 6 mm del origen. A esta distancia, se puede obtener una variación lineal de dicho factor con la deformación impuesta, tal como puede verse en la figura 4.9. La figura 4.10 muestra la variación del factor por distorsión por flexión con la deformación volumétrica impuesta midiendo a distintas distancias al origen de la base.

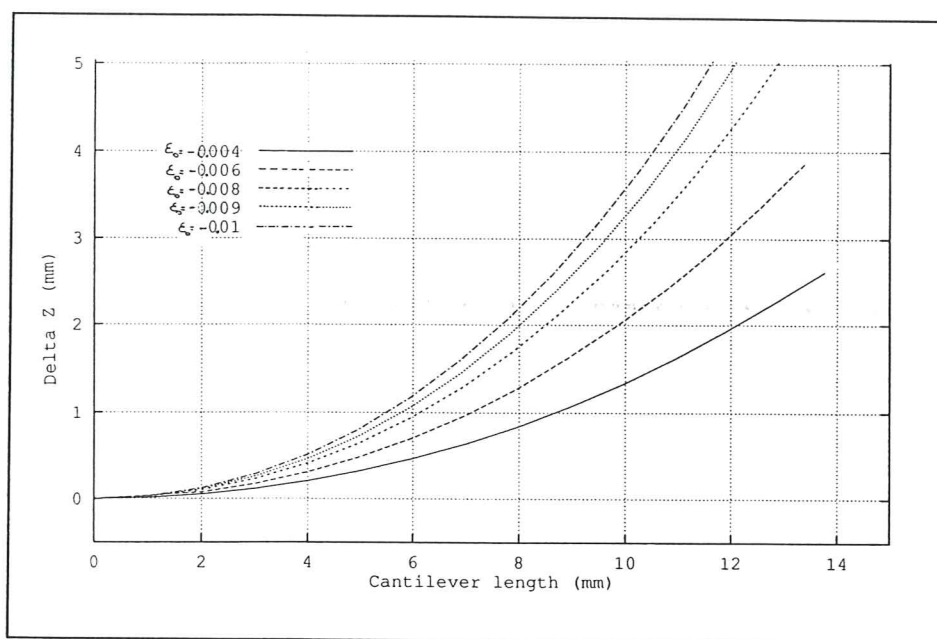


Figura 4.8 Variación del "Factor de distorsión por flexión" con las deformaciones volumétricas

Puede verse en dicha figura como deja de ser lineal esta relación, a mediada que nos alejamos de los 6 mm. Es de notar, además, que para valores inferiores a 6 mm la relación es lineal, pero las pendientes son demasiado pequeñas como para brindar mediciones fiables.

4.1.2.3 Influencia del módulo de Young en la distorsión por flexión

La figura 4.11 muestra una curva Delta Z en función de la longitud del voladizo para una deformación volumétrica impuesta del 0.8%. La misma fué obtenida para valores del módulo de Young de 120, 140, y 180 Kg/cm^2 ,

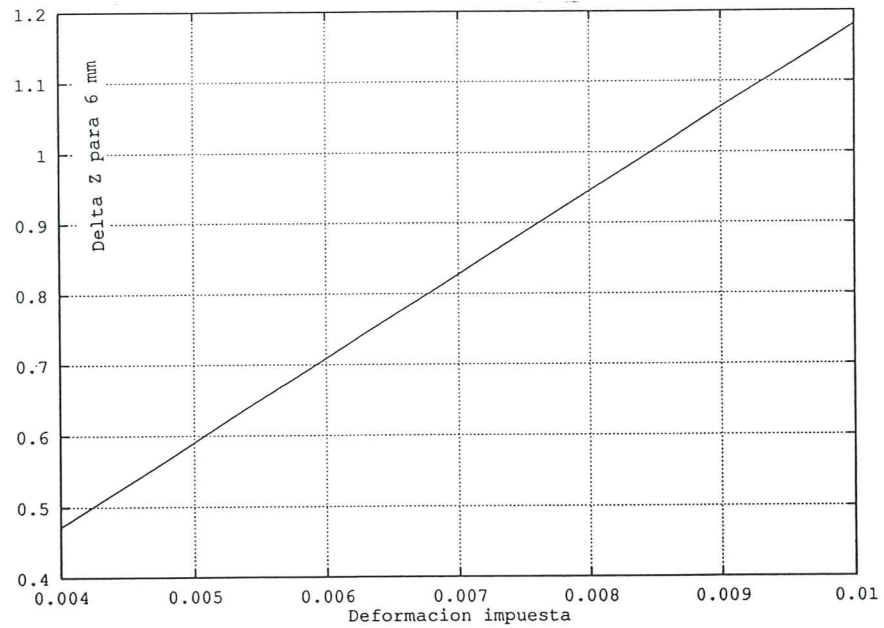


Figura 4.9 Variación del "Factor de distorsión por flexión" con las deformaciones volumétricas a 6 mm del voladizo.

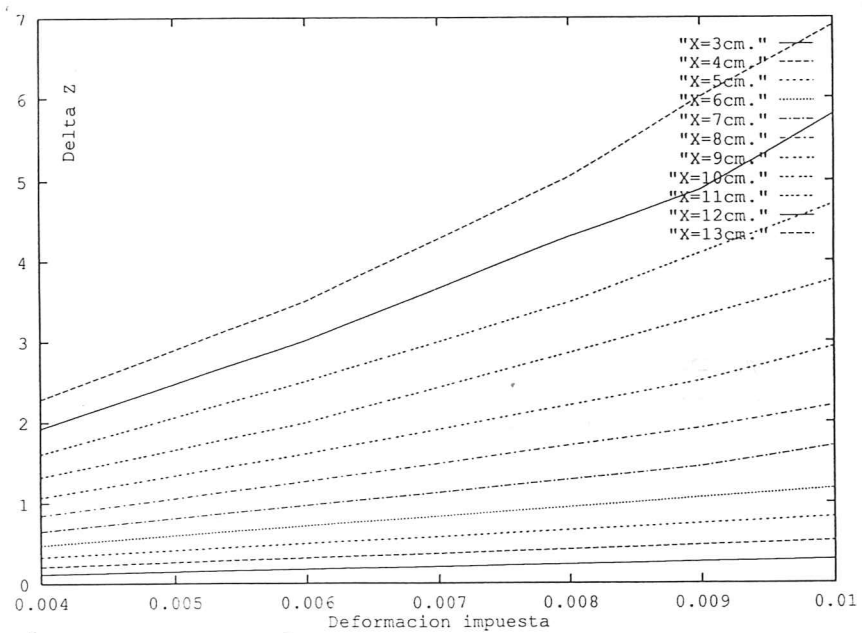


Figura 4.10 Variación del "Factor de distorsión por flexión" con las deformaciones volumétricas a distintas distancias del voladizo.

sin encontrar ninguna variación entre ellas. Como puede verse en la solución

analítica para dos capas obtenida anteriormente, los valores de deformaciones obtenidos son independientes del valor del módulo de Young.

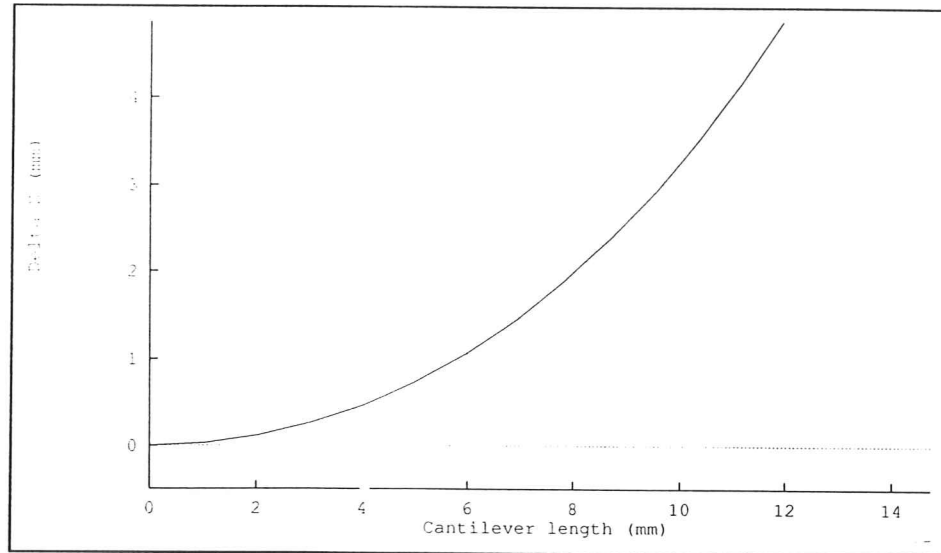


Figura 4.11 Variación del Delta Z con la longitud del voladizo obtenidas para distintos valores del módulo de Young

4.1.2.4 Influencia del coeficiente de Poisson en la distorsión por flexión

La figura 4.12 muestra una curva Delta Z en función de la longitud del voladizo para una deformación volumétrica impuesta del 0.8%. La misma fué obtenida para valores del coeficiente de Poisson de 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5, sin encontrar ninguna variación entre ellas. De la misma manera que con el módulo de Young, los valores de deformaciones obtenidos son independientes del valor del coeficiente de Poisson.

4.1.2.5 Influencia del tamaño de capa en la distorsión por flexión

El voladizo de la figura 4.1 ha sido modelado por elementos finitos cuadrangulares de cuatro nodos, suponiendo un proceso constructivo en 6, 12, 15, 20, 24 y 30 capas. En todos los casos se utilizaron las mismas

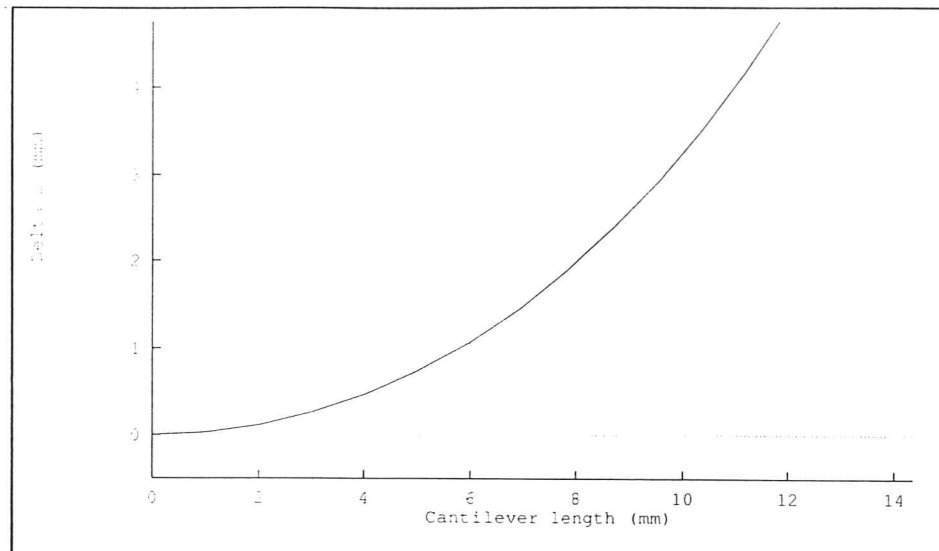


Figura 4.12 Variación del Delta Z con la longitud del voladizo obtenidas para distintos valores del coeficiente de Poisson

propiedades del material y en las figuras 4.13 a 4.17 pueden verse la geometría esperada y la deformada para 6, 12, 15 y 30 capas. La figura 4.18 muestra comparativamente los valores de Delta Z en función de la longitud del voladizo para cada una de los casos analizados, y la figura 4.19, la variación del factor de distorsión por flexión, es decir cuando Delta Z es la diferencia entre las elevaciones en milímetros de la base del voladizo a 6 mm. del origen y en el origen de la base. En todos los casos el valor de ϵ_0 fue del 0.8%. Como era de esperar, a medida que aumentamos el espesor de capa, disminuye la distorsión por flexión, como puede verse en la figura 4.19. Esto concuerda con los análisis dados en la referencia [3] y se debe al aumento de rigidez de las capas.

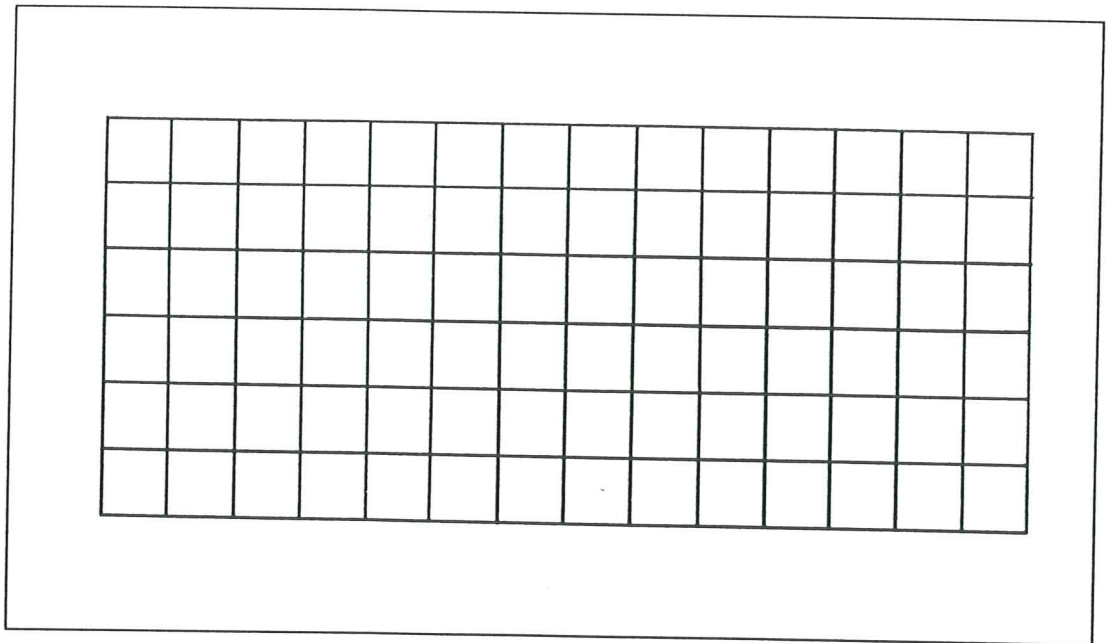


Figura 4.13 Geometría esperada para seis capas

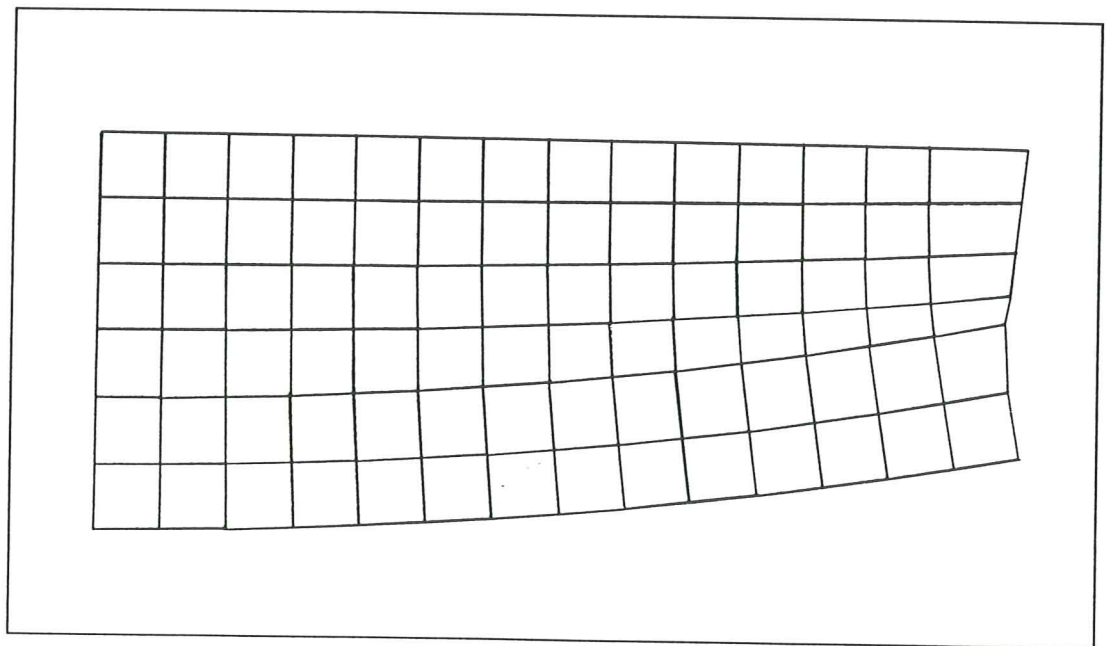


Figura 4.14 Geometría obtenida para seis capas

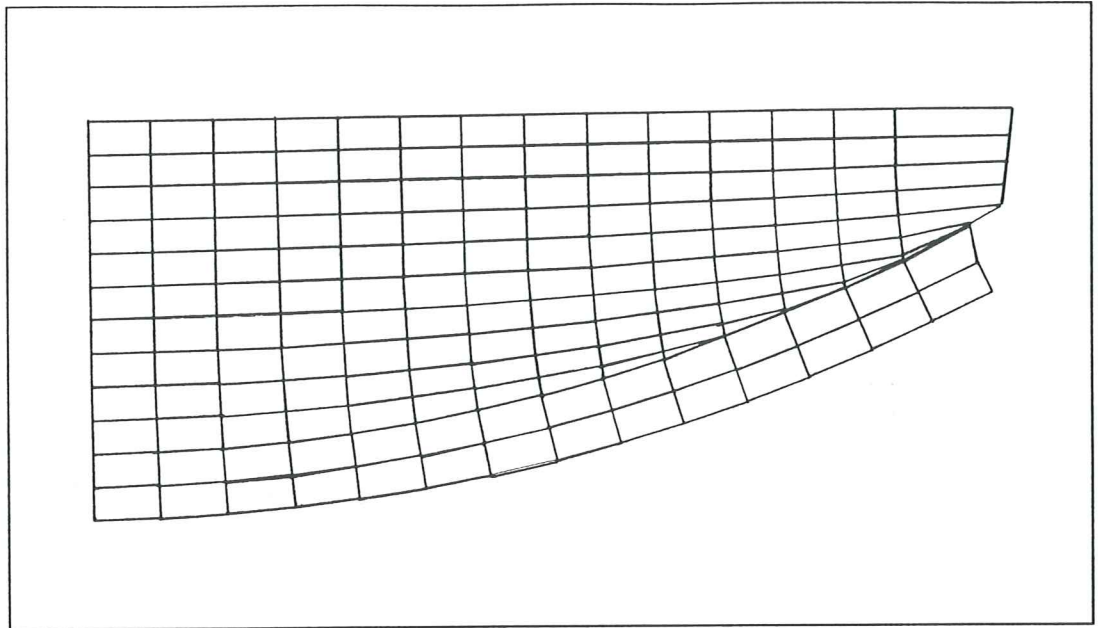


Figura 4.15 Geometría obtenida para doce capas

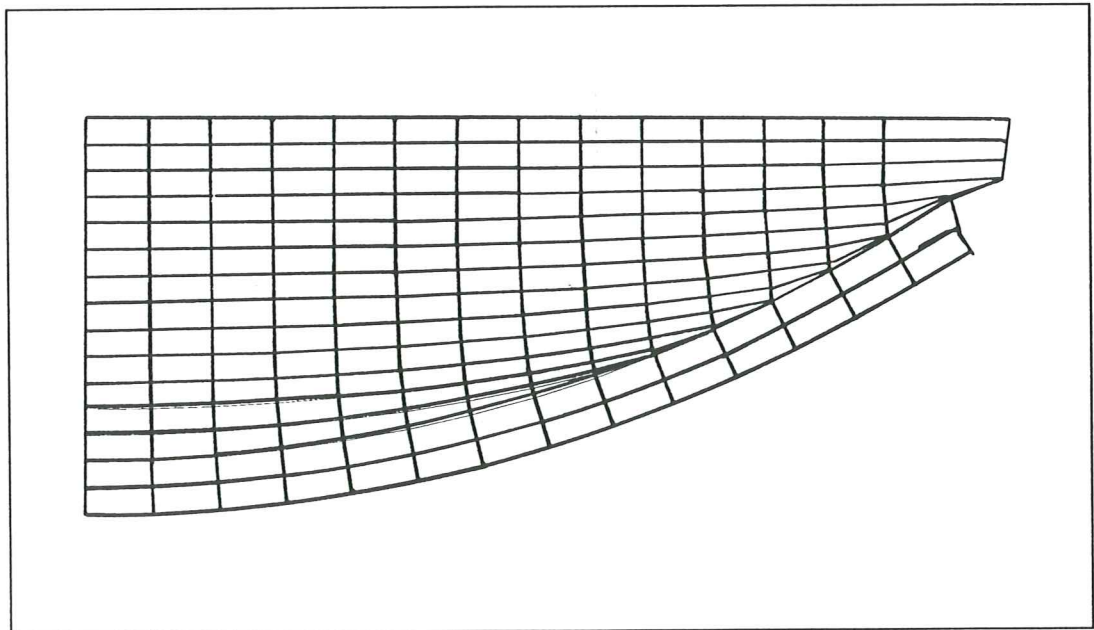


Figura 4.16 Geometría obtenida para quince capas

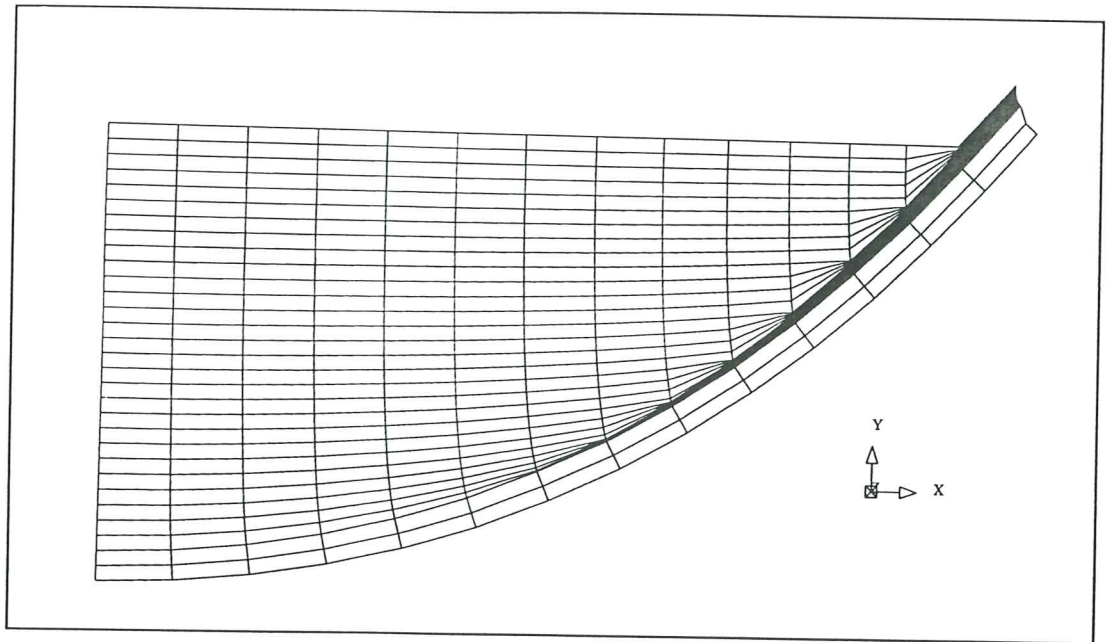


Figura 4.17 Geometría obtenida para treinta capas

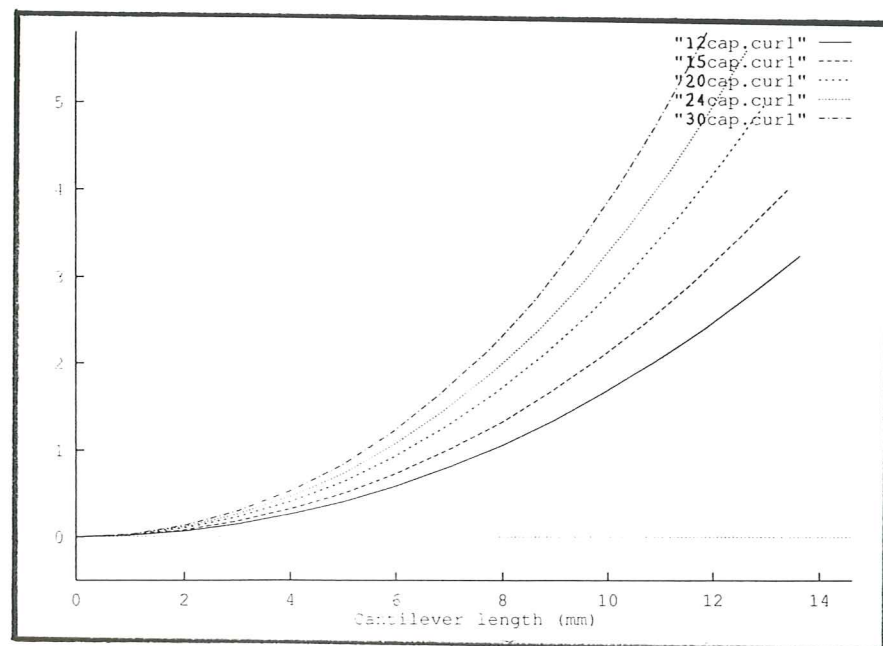


Figura 4.18 Variación del Delta Z con el tamaño de capa

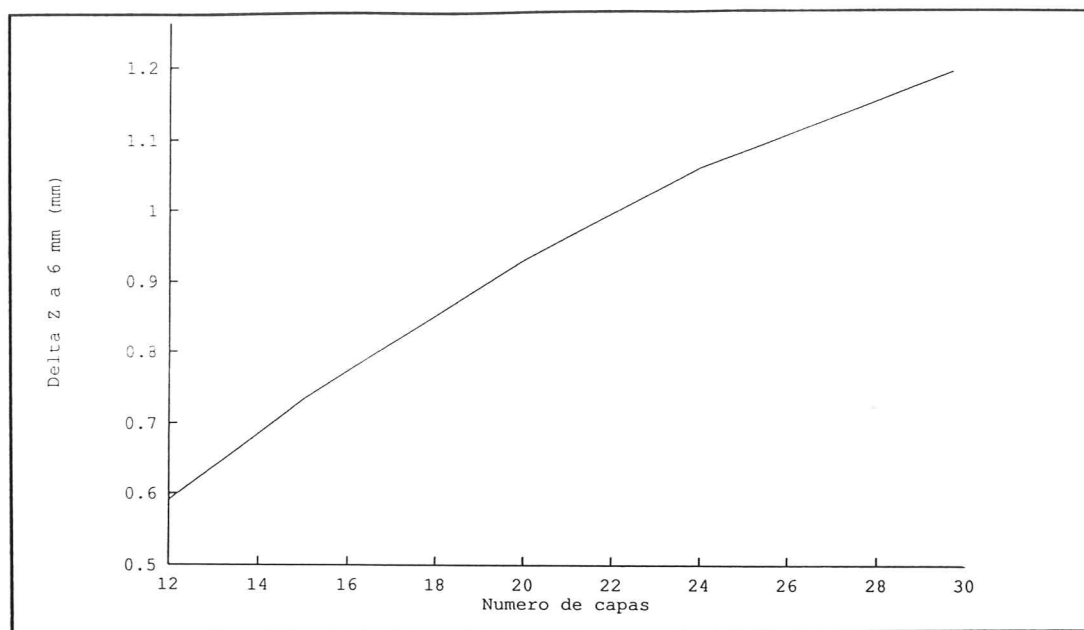


Figura 4.19 Variación del Factor de distorsión por flexión con el tamaño de capa

4.1.2.6 Análisis bidimensional con elementos sólidos de cuatro nodos

Se presenta un análisis del test extraído de la referencia [3] en el que se ha discretizado el voladizo con elementos sólidos de cuatro nodos con cuatro puntos de integración por elemento. En la dirección longitudinal se han colocado 7, 10, 14, 28, 40 y 56 elementos obteniéndose mejor aproximación a medida que aumentamos el número de elementos. En la figura 4.20 se muestran las primeras tres capas de proceso, obtenidas con 7, 14, 28 y 56 elementos en la dirección longitudinal.

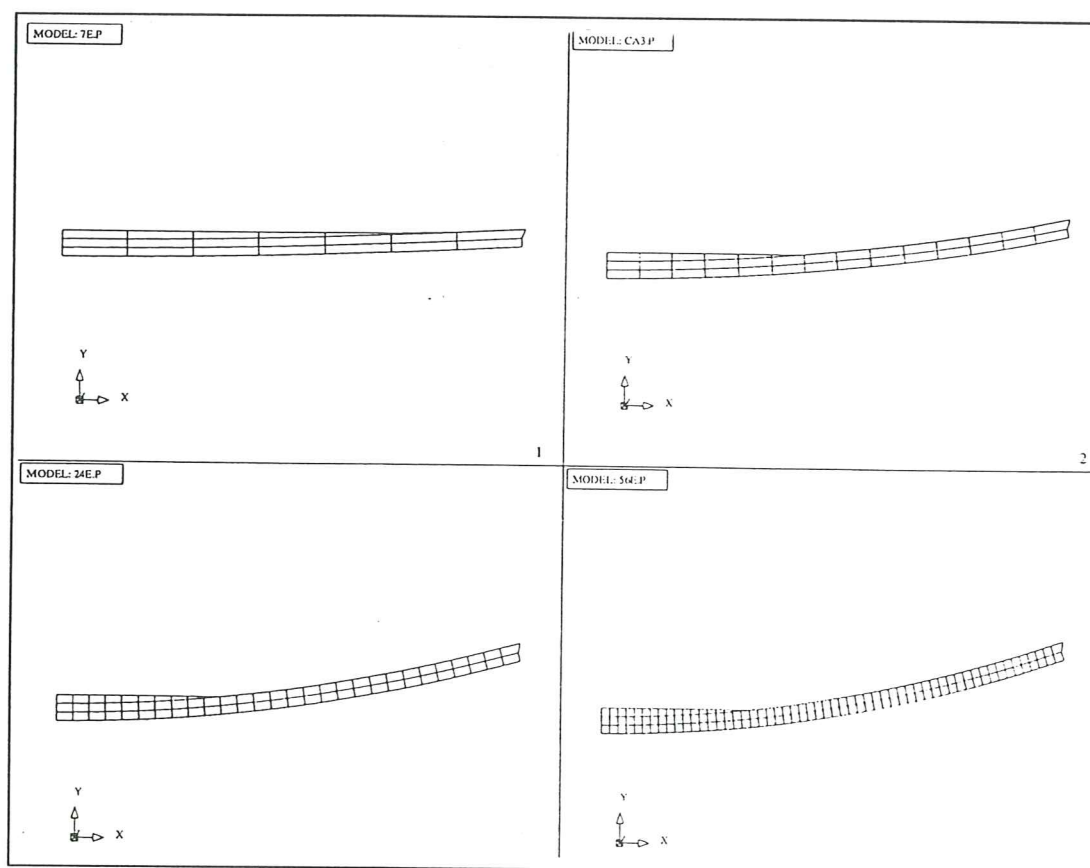


Figura 4.20 Geometrías deformadas para distintos números de elementos en la dirección longitudinal

En la tabla I puede verse la mejor aproximación obtenida con respecto a la solución analítica a medida que se aumenta el número de elementos.

	7 ELEM.	28 ELEM.	40 ELEM.	ANALIT.
NODO A	-0.0492	0.00397	0.01381	0.03100
NODO B	-0.0629	-0.0625	-0.0623	-0.0630
NODO C	-0.0772	-0.1300	-0.1400	-0.1575

Tabla I. Desplazamientos verticales en cm con elementos cuadriláteros de 4 nodos en A, B, y C respectivamente para distintas discretizaciones y la solución analítica

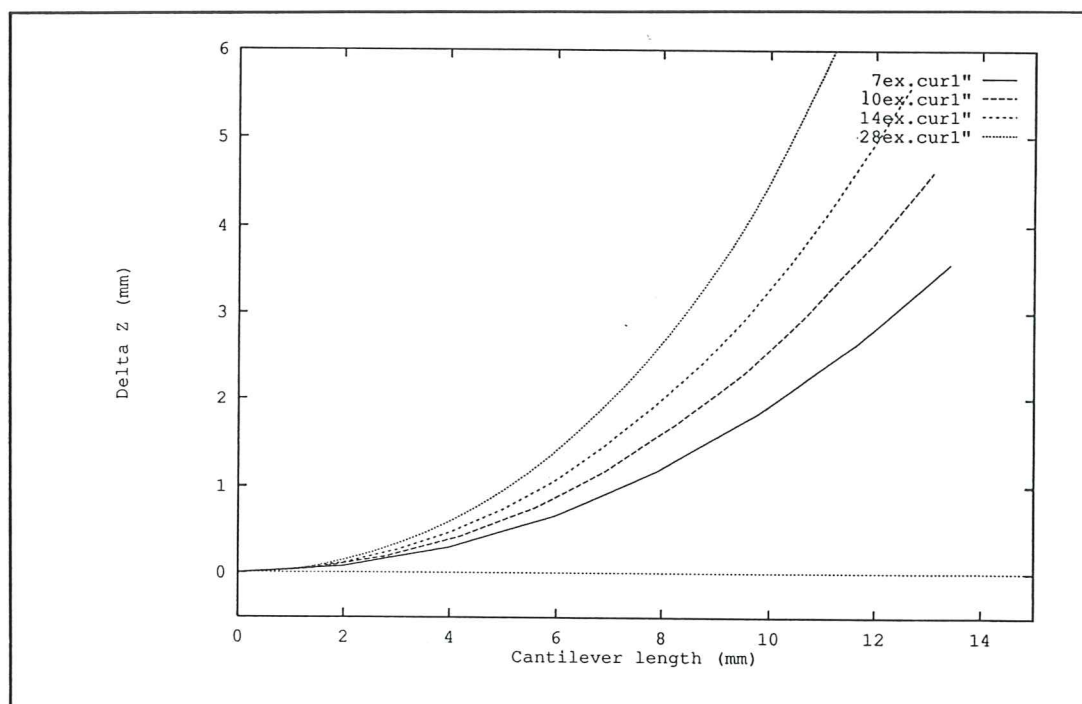


Figura 4.21 Variación del factor de distorsión por flexión para distinto número de elementos en la dirección longitudinal

En la figura 4.21 se muestran las variaciones del factor por distorsión por flexión para 7, 10, 14 y 28 elementos en la dirección longitudinal del voladizo.

4.1.2.7 Elementos de cuatro nodos y de ocho nodos con integración selectiva

Por lo visto anteriormente, los elementos de cuatro nodos tienen un mal comportamiento a la flexión, lo que los hace poco fiables en el modelado de procesos como el que nos atañe. Esto no ocurre con los elementos de ocho nodos, que reproducen los valores analíticos con una baja densidad de elementos. Dado que el costo computacional de los elementos de cuatro nodos es inferior al de los de ocho, y considerar este efecto es importante en el caso del modelado de procesos de "Rapid Prototyping", donde las piezas reales pueden tener del orden de 1000 capas, se implementaron los elementos de cuatro nodos con integración selectiva. En la tabla II se muestran comparativamente los valores de desplazamientos de los nodos extremos del voladizo para elementos de ocho nodos, de cuatro nodos con integración selectiva y analítico. Se utilizaron siete elementos en la dirección longitudinal. Es importante comparar los resultados de los elementos de cuatro nodos con integración selectiva, con los dados sin integración selectiva en la tabla I.

	4 NOD. I.S.	8 NODOS	ANALIT.
NODO A	0.02650	0.03060	0.03100
NODO B	-0.0622	-0.0622	-0.0630
NODO C	-0.1530	-0.1560	-0.1575

Tabla II. Desplazamientos en cm obtenidos con elementos cuadriláteros de 4 nodos con integración selectiva y 8 nodos, en A, B y C respectivamente.

4.1.2.8 Análisis tridimensional

Para el modelado tridimensional del proceso se pueden utilizar elementos hexahédricos de 8 y 20 nodos. Si bien los elementos de 20 nodos proporcionan mejores resultados a la flexión, poseen un costo computacional muy grande por lo que se ha implementado la integración selectiva en los elementos de ocho nodos bajo la misma metodología que para los elementos de cuatro nodos en dos dimensiones.

El ejemplo en cuestión, fue modelado con elementos sólidos de ocho nodos, con integración selectiva, y 20 nodos con integración plena. Los resultados obtenidos con ambos tipos de elementos guardan una muy buena correlación, por lo que se puede inferir que en este ejemplo en que la flexión es muy importante, los elementos sólidos de ocho nodos con integración selectiva se comportan muy bien. No ocurre lo mismo al utilizar integración plena, de la misma forma que ocurriría en el caso bidimensional con los elementos de cuatro nodos con o sin integración selectiva versus los elementos bidimensionales de ocho nodos. La figura 4.22 muestra las geometrías deformadas para 6, 12, 18 y 24 capas con elementos de ocho nodos.

4.1.2.9 Influencia del poscurado

El siguiente análisis es para medir la influencia del poscurado en las distorsiones verticales de la pieza del test de la referencia [3]. En un análisis tridimensional con elementos de ocho nodos se utilizaron tres valores distintos del coeficiente de contracción volumétrica en el poscurado. En las figuras 4.23, se muestran los resultados obtenidos. En la misma, se muestran los valores obtenidos en un proceso constructivo de 10 capas y el pos-curado. Se puede apreciar en la figura que los resultados entre la última capa constructiva y el curado no varían apreciablemente.

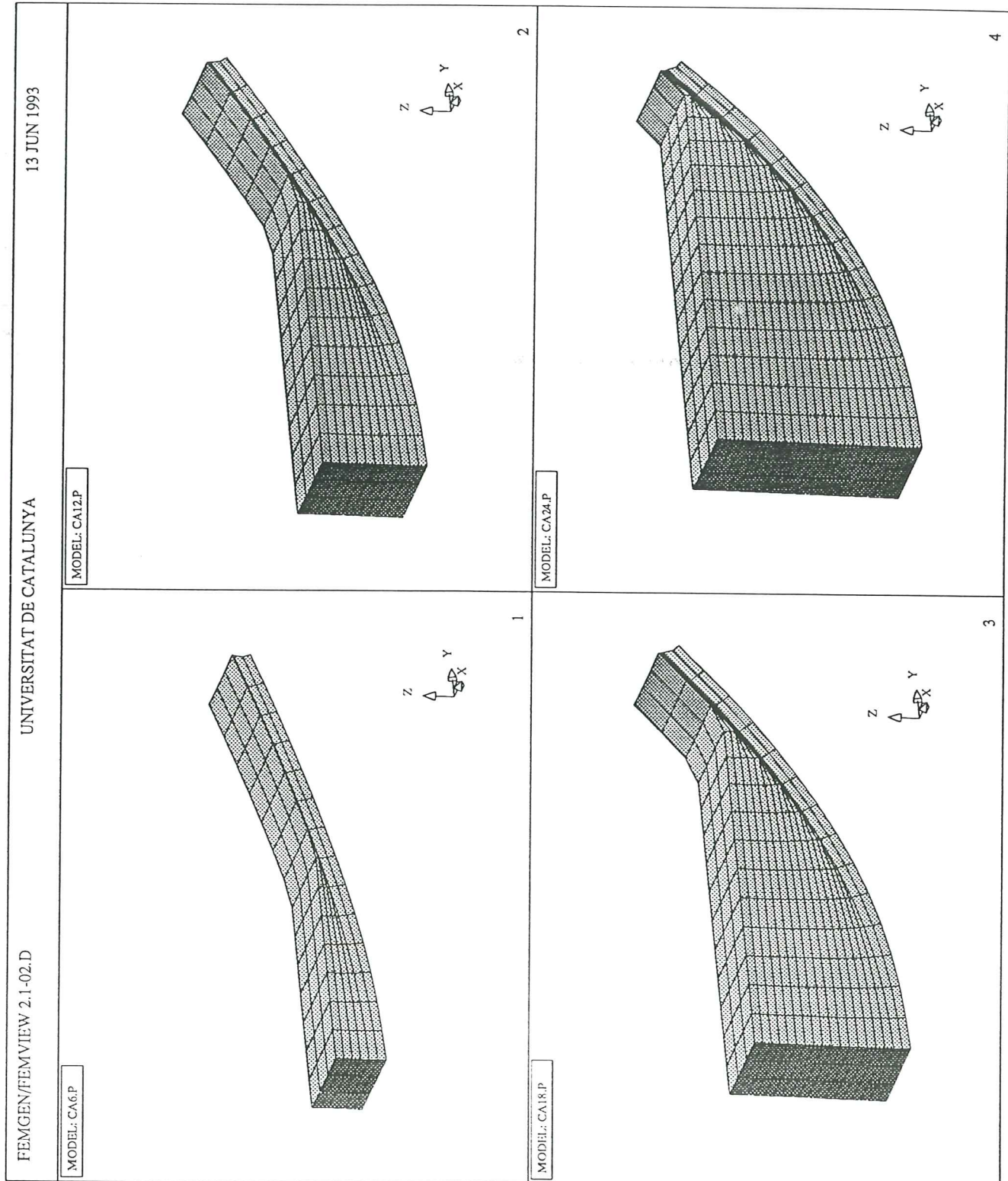


Figura 4.22 Geometrías deformadas para 6,12,18 y 24 capas - Elementos de ocho nodos

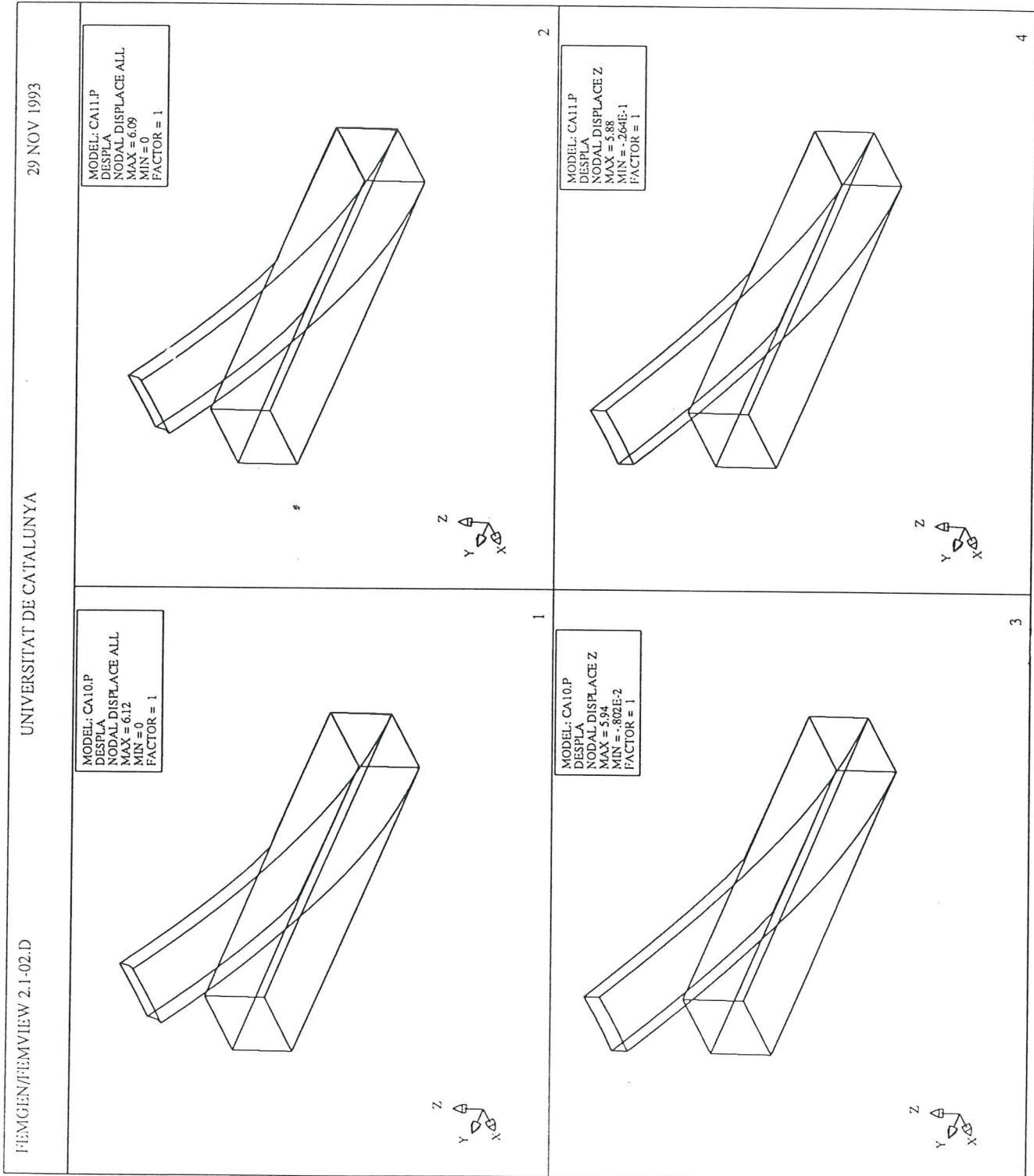


Figura 4.23 Efecto del poscurado en las distorsiones

1
24 24 24 1 0 1
RAPID PROTOTYPING - VIGA EN VOLADIZO

[illegible]

63	69	70	81	80
64	70	71	82	81
65	71	72	83	82
66	72	73	84	83
67	73	74	85	84
68	74	75	86	85
69	75	76	87	86
70	76	77	88	87
71	78	79	90	89
72	79	80	91	90
73	80	81	92	91
74	81	82	93	92
75	82	83	94	93
76	83	84	95	94
77	84	85	96	95
78	85	86	97	96
79	86	87	98	97
80	87	88	99	98
81	89	90	101	100
82	90	91	102	101
83	91	92	103	102
84	92	93	104	103
85	93	94	105	104
86	94	95	106	105
87	95	96	107	106
88	96	97	108	107
89	97	98	109	108
90	98	99	110	109
91	100	101	112	111
92	101	102	113	112
93	102	103	114	113
94	103	104	115	114
95	104	105	116	115
96	105	106	117	116
97	106	107	118	117
98	107	108	119	118
99	108	109	120	119
100	109	110	121	120
101	111	112	123	122
102	112	113	124	123
103	113	114	125	124
104	114	115	126	125
105	115	116	127	126
106	116	117	128	127
107	117	118	129	128
108	118	119	130	129
109	119	120	131	130
110	120	121	132	131
111	122	123	134	133
112	123	124	135	134
113	124	125	136	135
114	125	126	137	136
115	126	127	138	137
116	127	128	139	138
117	128	129	140	139
118	129	130	141	140
119	130	131	142	141
120	131	132	143	142
121	133	134	145	144
122	134	135	146	145
123	135	136	147	146
124	136	137	148	147
125	137	138	149	148
126	138	139	150	149
127	139	140	151	150
128	140	141	152	151

129	141	142	153	152
130	142	143	154	153
131	144	145	156	155
132	145	146	157	156
133	146	147	158	157
134	147	148	159	158
135	148	149	160	159
136	149	150	161	160
137	150	151	162	161
138	151	152	163	162
139	152	153	164	163
140	153	154	165	164
141	155	156	167	166
142	156	157	168	167
143	157	158	169	168
144	158	159	170	169
145	159	160	171	170
146	160	161	172	171
147	161	162	173	172
148	162	163	174	173
149	163	164	175	174
150	164	165	176	175
151	166	167	178	177
152	167	168	179	178
153	168	169	180	179
154	169	170	181	180
155	170	171	182	181
156	171	172	183	182
157	172	173	184	183
158	173	174	185	184
159	174	175	186	185
160	175	176	187	186
161	177	178	189	188
162	178	179	190	189
163	179	180	191	190
164	180	181	192	191
165	181	182	193	192
166	182	183	194	193
167	183	184	195	194
168	184	185	196	195
169	185	186	197	196
170	186	187	198	197
171	188	189	200	199
172	189	190	201	200
173	190	191	202	201
174	191	192	203	202
175	192	193	204	203
176	193	194	205	204
177	194	195	206	205
178	195	196	207	206
179	196	197	208	207
180	197	198	209	208
181	199	200	211	210
182	200	201	212	211
183	201	202	213	212
184	202	203	214	213
185	203	204	215	214
186	204	205	216	215
187	205	206	217	216
188	206	207	218	217
189	207	208	219	218
190	208	209	220	219
191	210	211	222	221
192	211	212	223	222
193	212	213	224	223
194	213	214	225	224

195	214	215	226	225
196	215	216	227	226
197	216	217	228	227
198	217	218	229	228
199	218	219	230	229
200	219	220	231	230
201	221	222	233	232
202	222	223	234	233
203	223	224	235	234
204	224	225	236	235
205	225	226	237	236
206	226	227	238	237
207	227	228	239	238
208	228	229	240	239
209	229	230	241	240
210	230	231	242	241
211	232	233	244	243
212	233	234	245	244
213	234	235	246	245
214	235	236	247	246
215	236	237	248	247
216	237	238	249	248
217	238	239	250	249
218	239	240	251	250
219	240	241	252	251
220	241	242	253	252
221	243	244	255	254
222	244	245	256	255
223	245	246	257	256
224	246	247	258	257
225	247	248	259	258
226	248	249	260	259
227	249	250	261	260
228	250	251	262	261
229	251	252	263	262
230	252	253	264	263
231	254	255	266	265
232	255	256	267	266
233	256	257	268	267
234	257	258	269	268
235	258	259	270	269
236	259	260	271	270
237	260	261	272	271
238	261	262	273	272
239	262	263	274	273
240	263	264	275	274
1	0.00000	0.00000		
2	1.40000	0.00000		
3	2.80000	0.00000		
4	4.20000	0.00000		
5	5.60000	0.00000		
6	7.00000	0.00000		
7	8.40000	0.00000		
8	9.80000	0.00000		
9	11.20000	0.00000		
10	12.60000	0.00000		
11	14.00000	0.00000		
12	0.00000	0.25000		
13	1.40000	0.25000		
14	2.80000	0.25000		
15	4.20000	0.25000		
16	5.60000	0.25000		
17	7.00000	0.25000		
18	8.40000	0.25000		
19	9.80000	0.25000		
20	11.20000	0.25000		

21	12.60000	0.25000
22	14.00000	0.25000
23	0.00000	0.50000
24	1.40000	0.50000
25	2.80000	0.50000
26	4.20000	0.50000
27	5.60000	0.50000
28	7.00000	0.50000
29	8.40000	0.50000
30	9.80000	0.50000
31	11.20000	0.50000
32	12.60000	0.50000
33	14.00000	0.50000
34	0.00000	0.75000
35	1.40000	0.75000
36	2.80000	0.75000
37	4.20000	0.75000
38	5.60000	0.75000
39	7.00000	0.75000
40	8.40000	0.75000
41	9.80000	0.75000
42	11.20000	0.75000
43	12.60000	0.75000
44	14.00000	0.75000
45	0.00000	1.00000
46	1.40000	1.00000
47	2.80000	1.00000
48	4.20000	1.00000
49	5.60000	1.00000
50	7.00000	1.00000
51	8.40000	1.00000
52	9.80000	1.00000
53	11.20000	1.00000
54	12.60000	1.00000
55	14.00000	1.00000
56	0.00000	1.25000
57	1.40000	1.25000
58	2.80000	1.25000
59	4.20000	1.25000
60	5.60000	1.25000
61	7.00000	1.25000
62	8.40000	1.25000
63	9.80000	1.25000
64	11.20000	1.25000
65	12.60000	1.25000
66	14.00000	1.25000
67	0.00000	1.50000
68	1.40000	1.50000
69	2.80000	1.50000
70	4.20000	1.50000
71	5.60000	1.50000
72	7.00000	1.50000
73	8.40000	1.50000
74	9.80000	1.50000
75	11.20000	1.50000
76	12.60000	1.50000
77	14.00000	1.50000
78	0.00000	1.75000
79	1.40000	1.75000
80	2.80000	1.75000
81	4.20000	1.75000
82	5.60000	1.75000
83	7.00000	1.75000
84	8.40000	1.75000
85	9.80000	1.75000
86	11.20000	1.75000

87	12.60000	1.75000
88	14.00000	1.75000
89	0.00000	2.00000
90	1.40000	2.00000
91	2.80000	2.00000
92	4.20000	2.00000
93	5.60000	2.00000
94	7.00000	2.00000
95	8.40000	2.00000
96	9.80000	2.00000
97	11.20000	2.00000
98	12.60000	2.00000
99	14.00000	2.00000
100	0.00000	2.25000
101	1.40000	2.25000
102	2.80000	2.25000
103	4.20000	2.25000
104	5.60000	2.25000
105	7.00000	2.25000
106	8.40000	2.25000
107	9.80000	2.25000
108	11.20000	2.25000
109	12.60000	2.25000
110	14.00000	2.25000
111	0.00000	2.50000
112	1.40000	2.50000
113	2.80000	2.50000
114	4.20000	2.50000
115	5.60000	2.50000
116	7.00000	2.50000
117	8.40000	2.50000
118	9.80000	2.50000
119	11.20000	2.50000
120	12.60000	2.50000
121	14.00000	2.50000
122	0.00000	2.75000
123	1.40000	2.75000
124	2.80000	2.75000
125	4.20000	2.75000
126	5.60000	2.75000
127	7.00000	2.75000
128	8.40000	2.75000
129	9.80000	2.75000
130	11.20000	2.75000
131	12.60000	2.75000
132	14.00000	2.75000
133	0.00000	3.00000
134	1.40000	3.00000
135	2.80000	3.00000
136	4.20000	3.00000
137	5.60000	3.00000
138	7.00000	3.00000
139	8.40000	3.00000
140	9.80000	3.00000
141	11.20000	3.00000
142	12.60000	3.00000
143	14.00000	3.00000
144	0.00000	3.25000
145	1.40000	3.25000
146	2.80000	3.25000
147	4.20000	3.25000
148	5.60000	3.25000
149	7.00000	3.25000
150	8.40000	3.25000
151	9.80000	3.25000
152	11.20000	3.25000

153	12.60000	3.25000
154	14.00000	3.25000
155	0.00000	3.50000
156	1.40000	3.50000
157	2.80000	3.50000
158	4.20000	3.50000
159	5.60000	3.50000
160	7.00000	3.50000
161	8.40000	3.50000
162	9.80000	3.50000
163	11.20000	3.50000
164	12.60000	3.50000
165	14.00000	3.50000
166	0.00000	3.75000
167	1.40000	3.75000
168	2.80000	3.75000
169	4.20000	3.75000
170	5.60000	3.75000
171	7.00000	3.75000
172	8.40000	3.75000
173	9.80000	3.75000
174	11.20000	3.75000
175	12.60000	3.75000
176	14.00000	3.75000
177	0.00000	4.00000
178	1.40000	4.00000
179	2.80000	4.00000
180	4.20000	4.00000
181	5.60000	4.00000
182	7.00000	4.00000
183	8.40000	4.00000
184	9.80000	4.00000
185	11.20000	4.00000
186	12.60000	4.00000
187	14.00000	4.00000
188	0.00000	4.25000
189	1.40000	4.25000
190	2.80000	4.25000
191	4.20000	4.25000
192	5.60000	4.25000
193	7.00000	4.25000
194	8.40000	4.25000
195	9.80000	4.25000
196	11.20000	4.25000
197	12.60000	4.25000
198	14.00000	4.25000
199	0.00000	4.50000
200	1.40000	4.50000
201	2.80000	4.50000
202	4.20000	4.50000
203	5.60000	4.50000
204	7.00000	4.50000
205	8.40000	4.50000
206	9.80000	4.50000
207	11.20000	4.50000
208	12.60000	4.50000
209	14.00000	4.50000
210	0.00000	4.75000
211	1.40000	4.75000
212	2.80000	4.75000
213	4.20000	4.75000
214	5.60000	4.75000
215	7.00000	4.75000
216	8.40000	4.75000
217	9.80000	4.75000
218	11.20000	4.75000

219	12.60000	4.75000				
220	14.00000	4.75000				
221	0.00000	5.00000				
222	1.40000	5.00000				
223	2.80000	5.00000				
224	4.20000	5.00000				
225	5.60000	5.00000				
226	7.00000	5.00000				
227	8.40000	5.00000				
228	9.80000	5.00000				
229	11.20000	5.00000				
230	12.60000	5.00000				
231	14.00000	5.00000				
232	0.00000	5.25000				
233	1.40000	5.25000				
234	2.80000	5.25000				
235	4.20000	5.25000				
236	5.60000	5.25000				
237	7.00000	5.25000				
238	8.40000	5.25000				
239	9.80000	5.25000				
240	11.20000	5.25000				
241	12.60000	5.25000				
242	14.00000	5.25000				
243	0.00000	5.50000				
244	1.40000	5.50000				
245	2.80000	5.50000				
246	4.20000	5.50000				
247	5.60000	5.50000				
248	7.00000	5.50000				
249	8.40000	5.50000				
250	9.80000	5.50000				
251	11.20000	5.50000				
252	12.60000	5.50000				
253	14.00000	5.50000				
254	0.00000	5.75000				
255	1.40000	5.75000				
256	2.80000	5.75000				
257	4.20000	5.75000				
258	5.60000	5.75000				
259	7.00000	5.75000				
260	8.40000	5.75000				
261	9.80000	5.75000				
262	11.20000	5.75000				
263	12.60000	5.75000				
264	14.00000	5.75000				
265	0.00000	6.00000				
266	1.40000	6.00000				
267	2.80000	6.00000				
268	4.20000	6.00000				
269	5.60000	6.00000				
270	7.00000	6.00000				
271	8.40000	6.00000				
272	9.80000	6.00000				
273	11.20000	6.00000				
274	12.60000	6.00000				
275	14.00000	6.00000				
1	0.25					
1						
2	0.00					
111	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1.4E2		0.30	3.0		
CAPA NRO. 1						
0	1	0	0			
2	0.25					
1						

2	0.00					
111	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1.4E2		0.30	3.0		
CAPA NRO. 2						
0	1	0	0			
3	0.25					
1						
2	0.00					
111	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1.4E2		0.30	3.0		
CAPA NRO. 3						
0	1	0	0			
4	0.25					
1						
2	0.00					
111	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1.4E2		0.30	3.0		
CAPA NRO. 4						
0	1	0	0			
5	0.25					
1						
2	0.00					
111	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1.4E2		0.30	3.0		
CAPA NRO. 5						
0	1	0	0			
6	0.25					
1						
2	0.00					
111	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1.4E2		0.30	3.0		
CAPA NRO. 6						
0	1	0	0			
7	0.25					
1						
2	0.00					
111	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1.4E2		0.30	3.0		
CAPA NRO. 7						
0	1	0	0			
8	0.25					
1						
2	0.00					
111	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1.4E2		0.30	3.0		
CAPA NRO. 8						
0	1	0	0			
9	0.25					
1						
2	0.00					
111	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1.4E2		0.30	3.0		
CAPA NRO. 9						
0	1	0	0			
10	0.25					
1						
2	0.00					
111	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1.4E2		0.30	3.0		
CAPA NRO. 10						
0	1	0	0			
11	0.25					
1						
2	0.00					
111	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1.4E2		0.30	3.0		

CAPA NRO. 11

0	1	0	0				
12		0.25					
1							
2		0.00					
111		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1		1.4E2		0.30	3.0		

CAPA NRO. 12

0	1	0	0				
13		0.25					
1							
2		0.00					
111		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1		1.4E2		0.30	3.0		

CAPA NRO. 13

0	1	0	0				
14		0.25					
1							
2		0.00					
111		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1		1.4E2		0.30	3.0		

CAPA NRO. 14

0	1	0	0				
15		0.25					
1							
2		0.00					
111		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1		1.4E2		0.30	3.0		

CAPA NRO. 15

0	1	0	0				
16		0.25					
1							
2		0.00					
111		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1		1.4E2		0.30	3.0		

CAPA NRO. 16

0	1	0	0				
17		0.25					
1							
2		0.00					
111		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1		1.4E2		0.30	3.0		

CAPA NRO. 17

0	1	0	0				
18		0.25					
1							
2		0.00					
111		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1		1.4E2		0.30	3.0		

CAPA NRO. 18

0	1	0	0				
19		0.25					
1							
2		0.00					
111		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1		1.4E2		0.30	3.0		

CAPA NRO. 19

0	1	0	0				
20		0.25					
1							
2		0.00					
111		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1		1.4E2		0.30	3.0		

CAPA NRO. 20

0	1	0	0				
21		0.25					

```

1
2      0.00
111    0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
1      1.4E2      0.30      3.0
CAPA NRO. 21
0      1      0      0
22     0.25
1
2      0.00
111    0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
1      1.4E2      0.30      3.0
CAPA NRO. 22
0      1      0      0
23     0.25
1
2      0.00
111    0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
1      1.4E2      0.30      3.0
CAPA NRO. 23
0      1      0      0
24     0.25
1
2      0.00
111    0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
1      1.4E2      0.30      3.0
CAPA NRO. 24
0      1      0      0

```

CA24.P

\$-----STOP ANALYSIS

STOP

4.2 PIEZA DE TEST

El siguiente ejemplo constituye una pieza de test utilizada por empresas que construyen y comercializan máquinas de estereolitografía. Su finalidad es la puesta a punto de las máquinas, ya que en función de la estandarización de su geometría y de los parámetros constructivos se conocen las dimensiones finales de la misma.

En la figura 4.24, se esquematiza la geometría y dimensiones de la pieza. A partir del archivo CAD, de la misma se puede construir la malla de elementos finitos utilizada. En nuestro caso se ha modelado la cuarta parte de la pieza con las condiciones de contorno correspondientes.

Se utilizó en un principio para su modelado, elementos sólidos de ocho nodos con integración selectiva, pero surgieron problemas de hourglass como se puede apreciar en la figura 4.25. Utilizar elementos de veinte nodos multiplica por cinco la memoria requerida y por diez el tiempo necesitado, no obstante se observó que en este ejemplo, en que la flexión no es dominante dado que durante todo el proceso constructivo y el poscurado la pieza se encuentra rígida al soporte de la máquina, los elementos de ocho nodos con integración plena proporcionan muy buenos resultados. En las figuras 4.26 y 4.27 se muestran el fichero CAD y la malla utilizada respectivamente.

La pieza, durante el proceso constructivo se encuentra fija al soporte móvil de la máquina, lo cual en el modelado se han tenido en cuenta tres procesos: El proceso constructivo propiamente dicho, el poscurado y posteriormente el quitar la pieza del soporte, en donde las reacciones que se han producido actúan como fuerzas localizadas, deformándola.

La figura 4.28 muestra la pieza final y en la figura 4.29 los desplazamientos en la dirección Z.

En la figura 4.30 se grafica la pieza final respecto a la geometría inicial, con el fin de mostrar el levantamiento que sufre la cara inferior de la pieza al desrigidizarla del soporte.

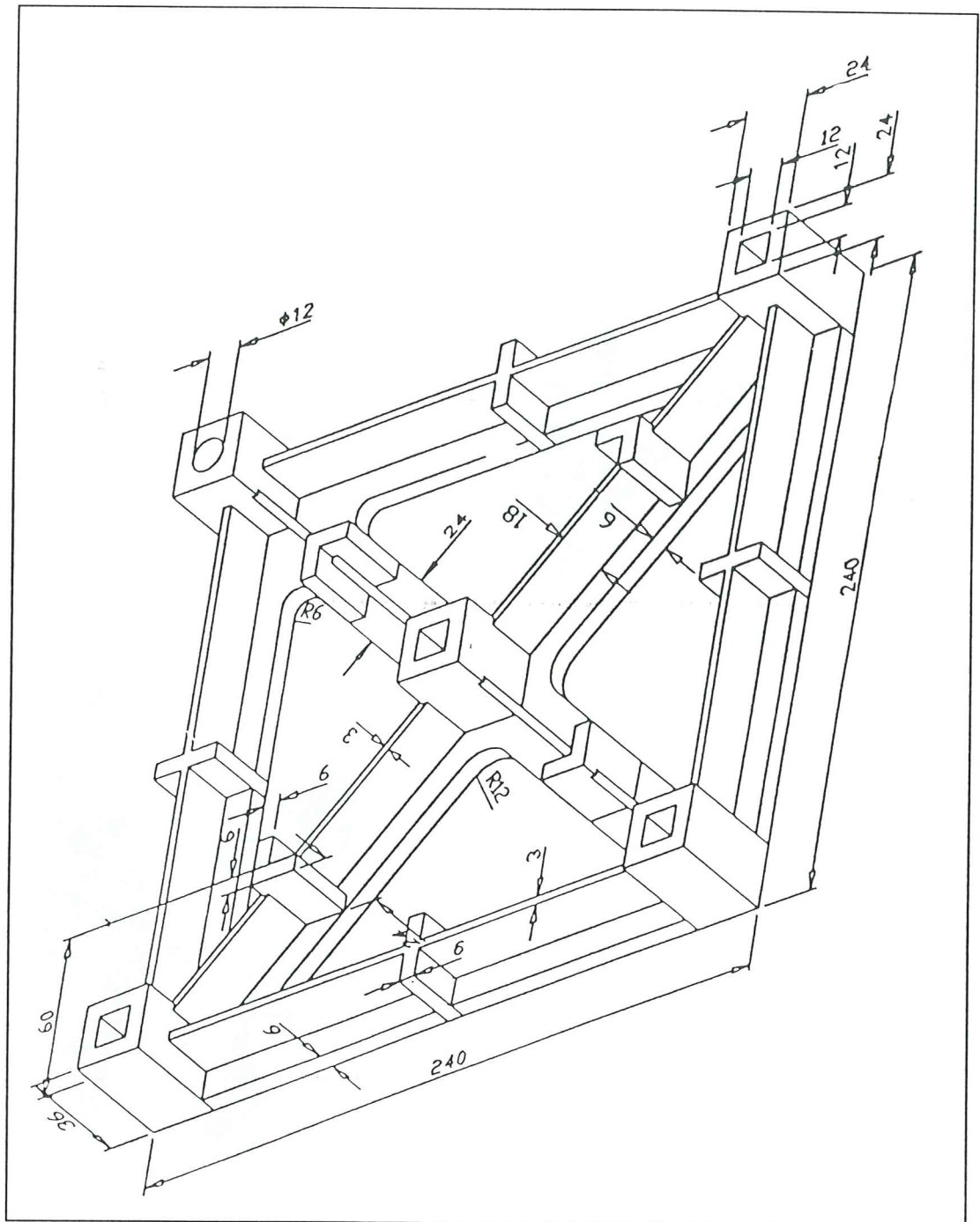


Figura 4.24 Pieza de Test - Geometría y dimensiones

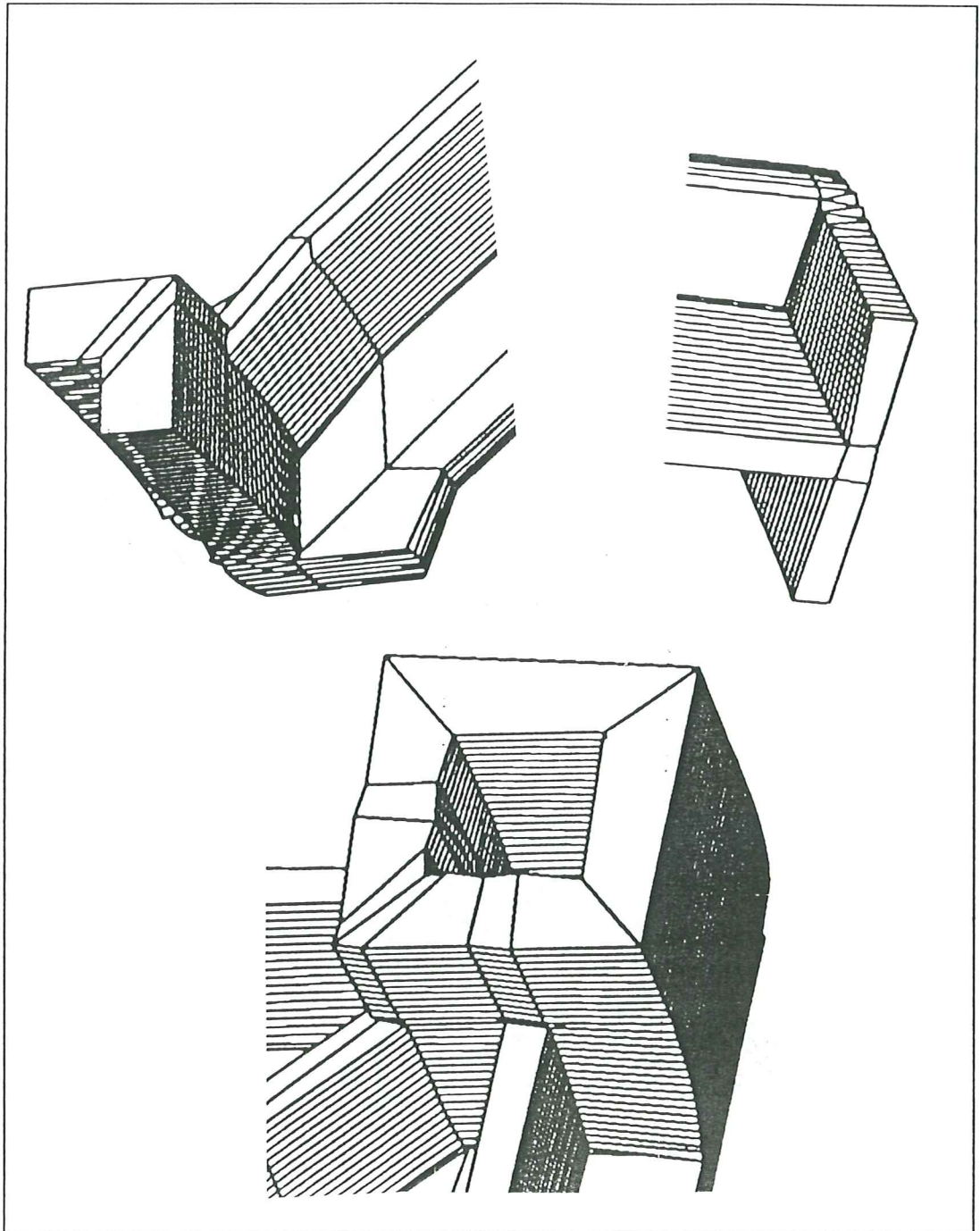


Figura 4.25 Efecto producido por el Hourglass

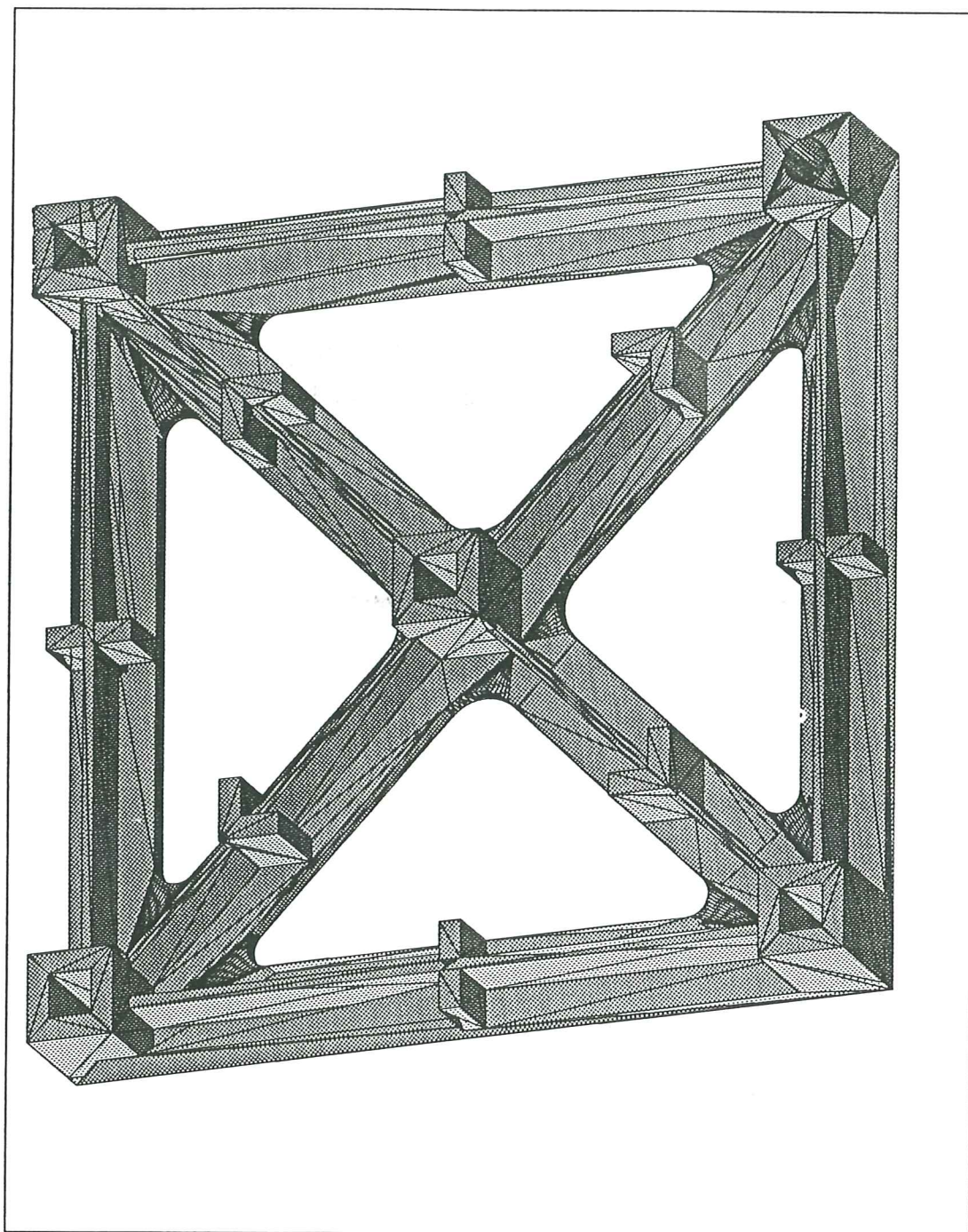


Figura 4.26 Fichero CAD - (Formato SLA)

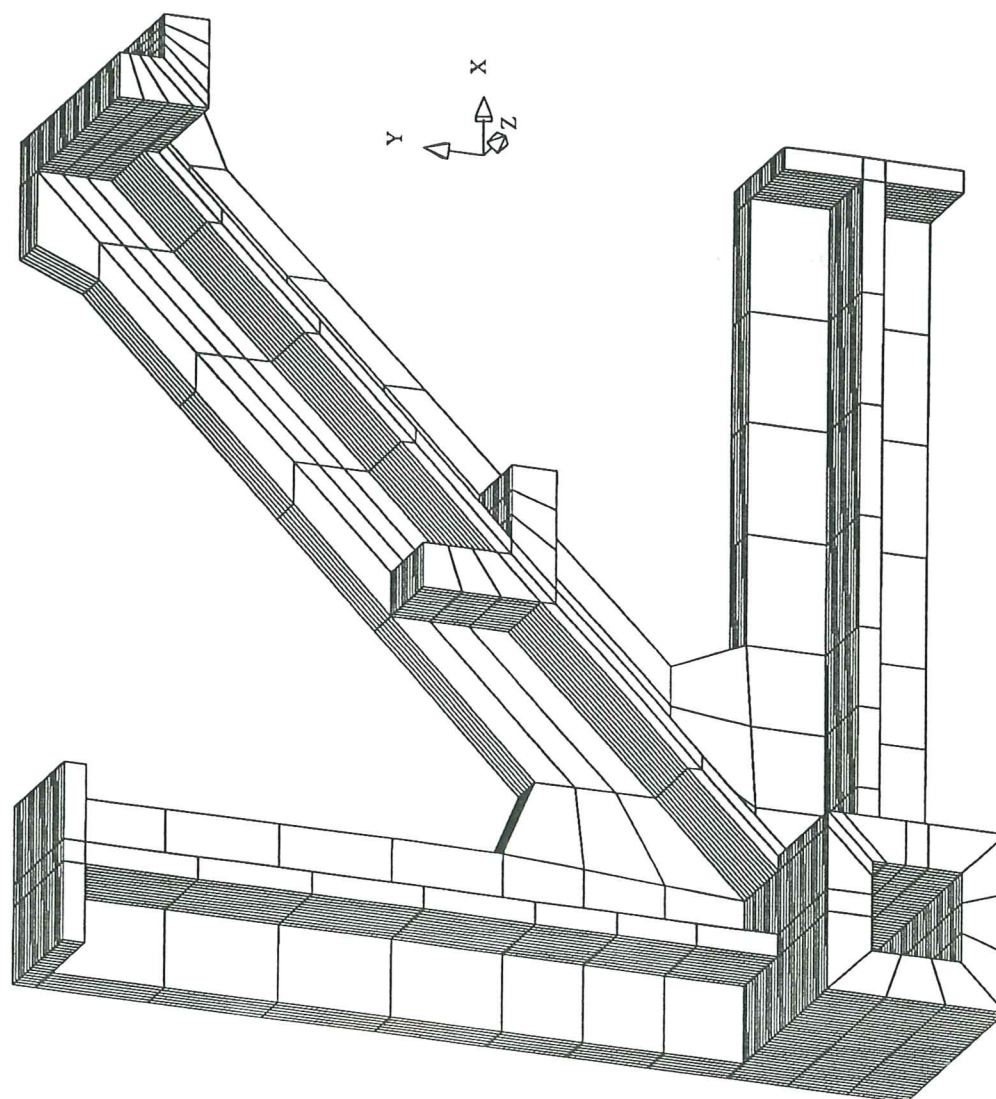


Figura 4.27 Malla de elementos finitos

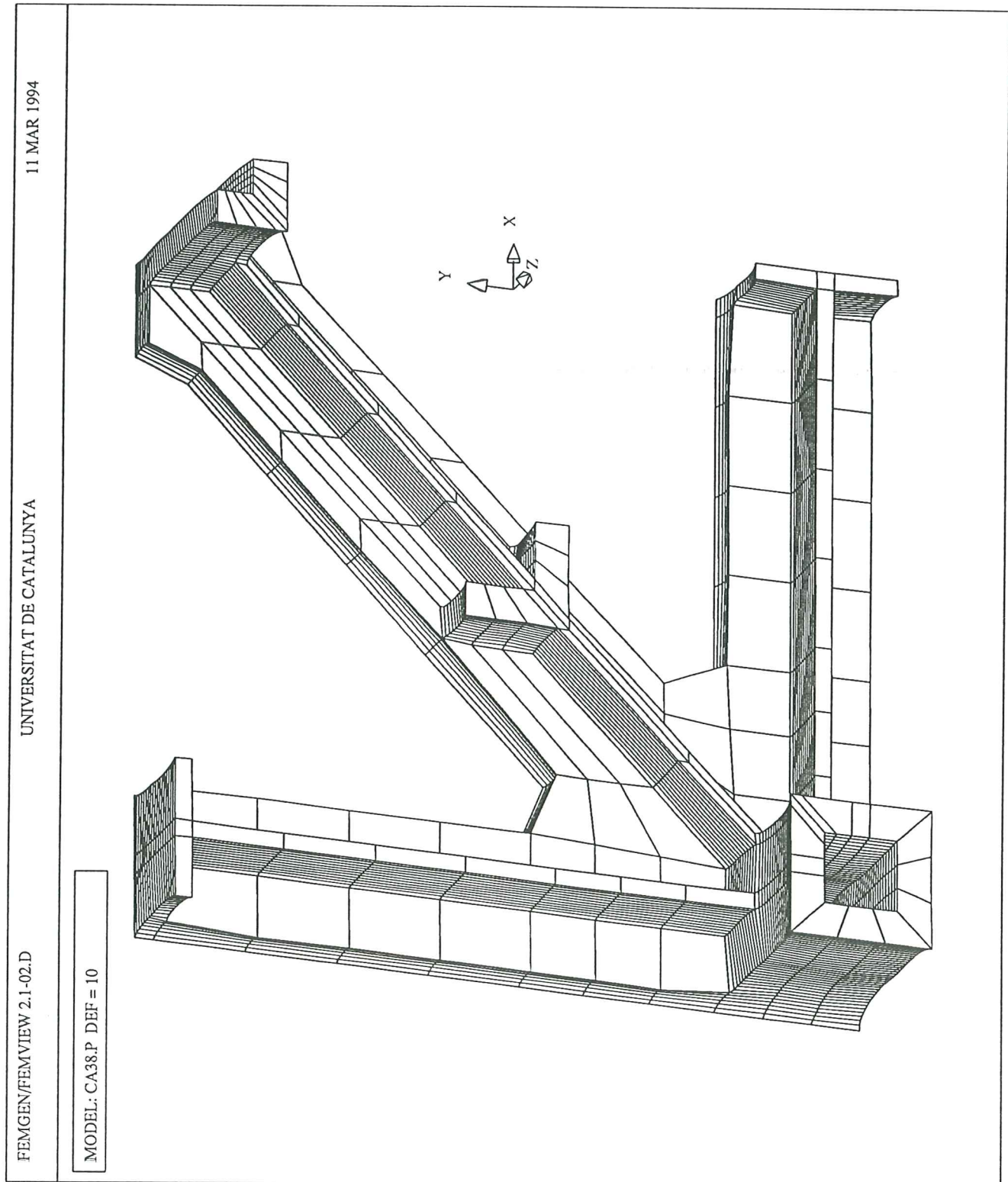


Figura 4.28 Pieza final

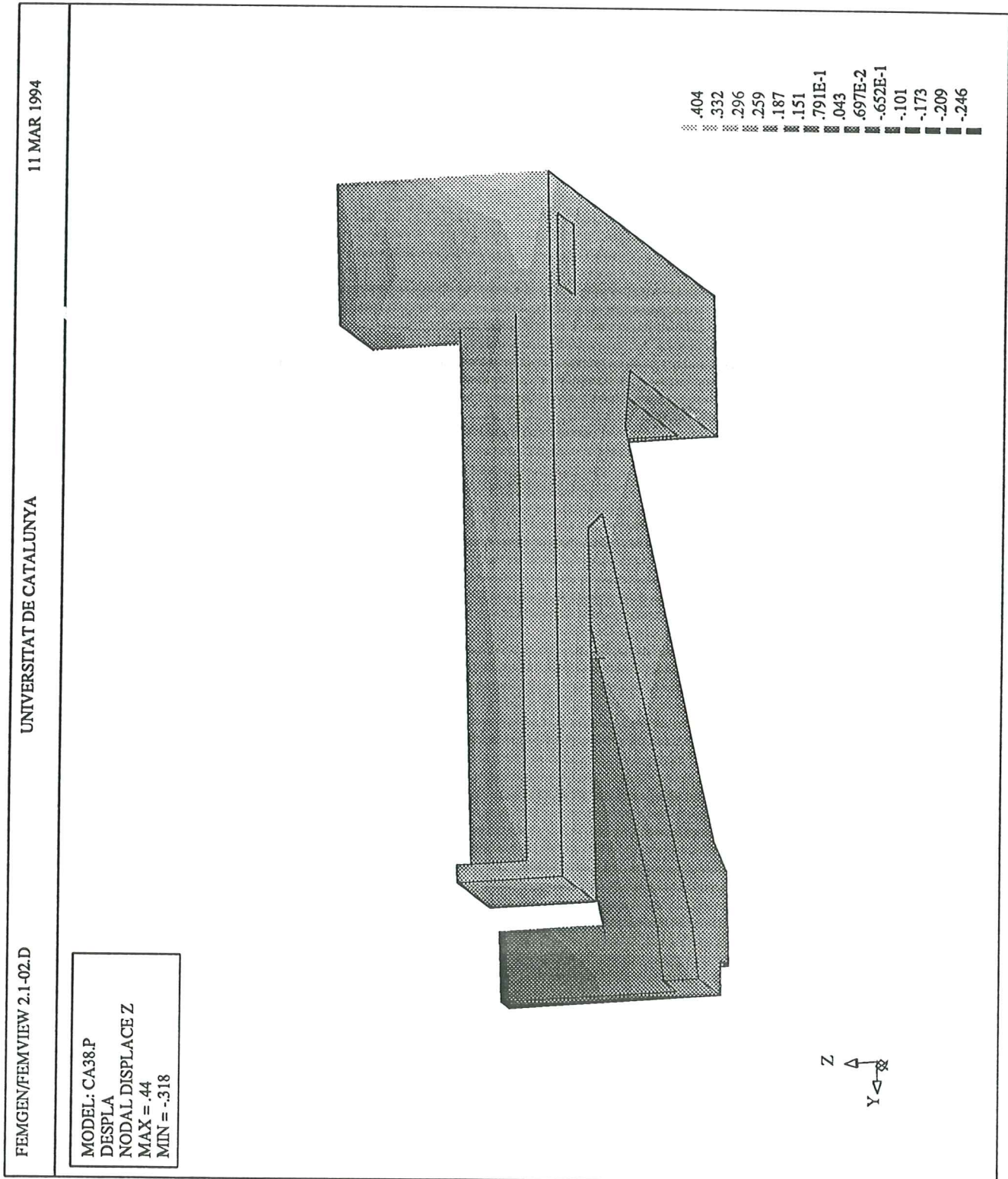


Figura 4.29 Pieza final - Desplazamientos

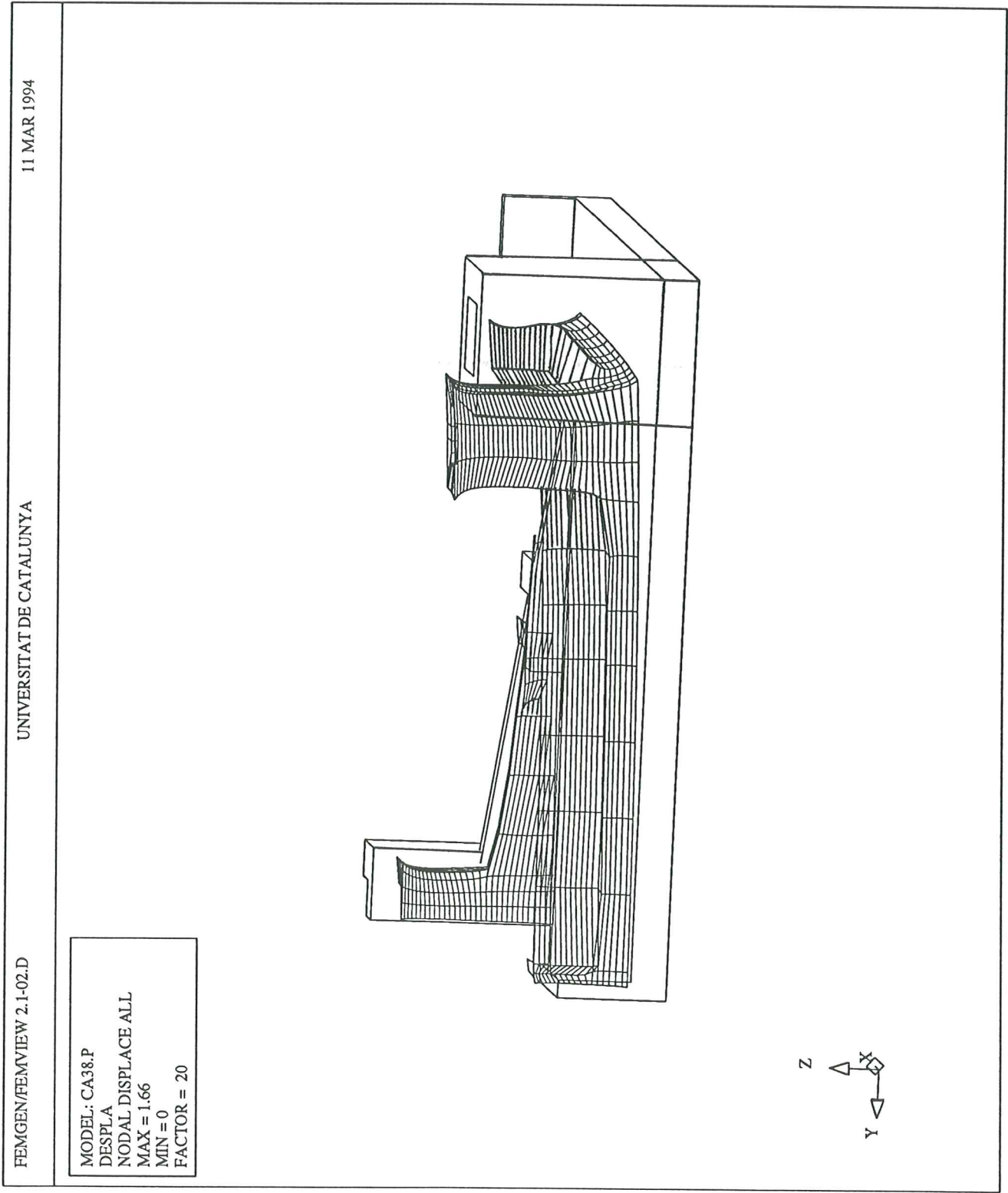


Figura 4.30 Pieza final respecto a la geometría inicial

REFERENCIAS

- [1] E. Oñate, S. Botello "CALSEF: Programa para Cálculo Estático Lineal de Sólidos y Estructuras por el Método de Elementos Finitos" Publicación CIMNE Nro.18, Febrero de 1992.

- [2] E. Oñate "Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos" Análisis Estático - Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Primera edición, Enero de 1992.

- [3] P. Jacobs "Rapid Prototyping and Manufacturing Fundamentals of Stereolithography" Society of Manufacturing Engineers, First Edition, 1992.

