

Herramienta EASY para el diseño de estructuras textiles

MSc. Carlos Henrique Hernández
Arq. Nelson Rodríguez

*Instituto del Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC)
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Universidad Central de Venezuela*

RESUMEN

Determinar las formas apropiadas para las estructuras con superficies de membranas a tensión (superficies textiles téniles: stressed membrane surface structures) es lo que se considera en este trabajo. La siguiente, es una breve introducción en el campo de las técnicas tradicionales para generar la forma de las membranas (practical surface design). Se presentan los conceptos generales más comunes para el equilibrio de los sistemas de modelado para luego entrar en una breve exposición sobre el *Método de Densidad de Fuerzas*, que es la base en el sistema de diseño del EASY.

El EASY es una novedosa herramienta de diseño que permite generar superficies estructurales anticlásticas o de dobles curvaturas en estado de tensión utilizando el método antes mencionado. Para cumplir con este objetivo, el programa construye una malla de cables integrada por puntos fijos, nodos y geometría del borde. Estos datos definen la configuración geométrica de la superficie y son capaces de simular el comportamiento de las estructuras al recibir esfuerzos internos y externos.

La parte en la que el EASY es realmente útil como programa viene en el proceso de generar los patrones. Y aunque no es nuestro objetivo en esta oportunidad, se introduce brevemente la forma clásica general del procedimiento de generación de patrones en los modelos reales y se compara con el procedimiento que utiliza el EASY lo que demuestra claramente que el programa permite la racionalización del proceso de diseño y construcción de este tipo de estructuras.

1. INTRODUCCION

El problema de generar las formas apropiadas para las estructuras textiles tensiles (stressed membrane surface structures) puede ser abordado de varias maneras. Normalmente en todas las oportunidades es necesario asegurar que la forma resultante de la superficie sea capaz de resistir la carga aplicada, al tiempo de satisfacer las limitaciones impuestas por las especificaciones arquitectónicas, debido fundamentalmente a la relación directa entre forma y distribución de fuerza en las estructuras de membranas (estructuras textiles), aspectos que a menudo yacen entre lo que se quiere y lo que es estructuralmente posible.

Desde un punto de vista puramente teórico, sería razonable suministrar tensión constante a la membrana entre los límites definidos por las especificaciones de arquitectura. Como estrategia se ignoran las condiciones de carga existentes, y la necesidad de construir paneles textiles anisotrópicos. Por ejemplo, la estructura radial diseñada con punto elevado usando superficies de tensión sufrirá en las áreas planas más alejadas del mástil central. Estas áreas estarían sometidas posiblemente a la turbulencia del viento, o podría ser peor, el agua. El requerimiento principal de los sistemas para generar la forma es por consiguiente, la posibilidad de derivar superficies (con dobles curvaturas) suaves (smooth surfaces) entre los límites propuestos para el caso (arbitrary boundaries). Es igualmente importante

además que la especificación de la curvatura de la superficie pueda ser fácilmente controlada.

2. TECNICAS CLASICAS PARA GENERAR LA FORMA DE LA MEMBRANA

Antes de tener las computadoras de hoy en día, el diseño de las estructuras de membranas de superficie tensada debía ser llevado a cabo empleando maquetas o empleando el método geométrico analítico. Aunque la técnica de la computadora tiene la ventaja de lograr una precisión muy grande, las limitaciones geométricas fueron tantas que solo las superficies neumáticas muy regulares pueden ser realmente diseñadas en la práctica con este sistema. Por otro lado, la construcción de las maquetas físicas, ha probado ser una herramienta muy flexible de diseño capaz de controlar todas las formas posibles. El aspecto desventajoso del método fue, sin embargo, que solo se podía obtener una precisión muy limitada. Además, cualquier modificación en el diseño requiere de la construcción de un nuevo modelo.

2.1. Maquetado Real

Entre los procedimientos para generar la forma deseada, tenemos dos métodos: uno es el de una superficie creada con película de jabón entre soportes rígidos de alambre. Esto por supuesto tendrá un período de vida corto, pero si se toman fotografías se pueden obtener datos (o información) geométrica de interés. Una de las

limitaciones fundamentales del modelado en pompas de jabón reside en el hecho de que las membranas (o películas) se encuentran en un estrés constante de las superficies, lo que no proporciona soluciones óptimas para muchas situaciones del diseño en la práctica.

De modo alternativo, si los modelos son construidos empleando membranas o telas de mucha elasticidad, se puede obtener un mejor control de la curvatura de la superficie. Dependiendo de la naturaleza de cada proyecto en particular y de los materiales usados, se pueden aplicar una gran variedad de técnicas para lograr acabados específicos. Por ejemplo, cuando usamos membranas plásticas, el calor puede ser aplicado localmente para incrementar la doble curvatura. De modo similar, si se emplea la tela de las medias de nylon, la rigidez del modelo puede ser logrado a través de la aplicación de resina epóxica. Parte de la popularidad del maquetado se ha apoyado en la utilidad que revisten a la hora de medir y construir los patrones.

2.2. Geometría Analítica

En lo que respecta al uso de la geometría analítica para la generación de la forma de la membrana es necesario que las superficies resultantes puedan ser descritas por un número preciso de ecuaciones. Como previamente establecimos, el uso del método analítico geométrico para la descripción de las superficies (u obtención de la información de las superficies) se restringe por consiguiente a aquellas estructuras que poseen formas muy simples. Debido a la complejidad inherente a la construcción de conchas de concreto reforzado, este método ha probado ser eficaz en este campo. Pero con procedimientos totalmente distintos de fabricación y las limitaciones experimentadas en la práctica de la construcción de estas estructuras de membranas, los tipos de estructuras apropiados para este tratamiento son las cubiertas neumáticas y los paracaídas.

2.3. Maquetado en equilibrio

Las bases fundamentales de la mayoría de los sistemas de computación utilizados para el diseño de estructuras de membranas es en alguna forma de generar un maquetado en equilibrio (equilibrium modeling). En tales sistemas, la estructura se distingue de otras porque forma una malla de elementos finitos de topología fija que, exceptuando los puntos fijos solo se aproximan a coordenadas nodales.

Dependiendo en particular del tipo de elemento finito usado, las fuerzas elementales internas se pueden determinar a partir de este sumando todos los nodos. Una vez que se aplica cualquier carga externa, se pueden determinar las fuerzas residuales nodales que quedan fuera de equilibrio. Una de las principales ventajas de usar este sistema para generar la forma es que se puede simular el grupo de fuerzas que se producen al aplicar pre-tensiones (prestress) y la carga esperada.

2.4. PRINCIPIOS MATEMÁTICOS CON LOS QUE FUNCIONA EL PROGRAMA

2.4.1. La Fuerza de Densidad de la Forma Generada

El método de Densidad de Fuerza es una estrategia matemática para resolver ecuaciones de equilibrio para cualquier tipo de malla de cables (cable network) sin necesitar una coordenada inicial de la estructura. La idea fundamental se apoya en que se asume un estado de equilibrio cuando las fuerzas internas y externas están balanceadas.

2.4.2. Análisis de Densidad Estática de la Fuerza

El *Método de Densidad de la Fuerza* funciona eficientemente si se busca realizar el análisis no lineal de las estructuras, que es necesario para los casos de carga simulados en computador. El aspecto (background) teórico fue comparado con el *Método de los Elementos Finitos*, demostrándose que el set de formulas de aplicación de este método puede ser derivado directamente del concepto de *Aproximación de la Fuerza de Densidades*. Sin embargo, éste último método ha probado ser numéricamente más estable al cálculo de grandes estructuras con grandes deflexiones, donde la estructura puede quedar parcialmente floja.

Previo a cualquier análisis estático la estructura generada por la vía de la solución del sistema de ecuaciones lineales de Densidad de la Fuerza referida en párrafos previos, tiene que ser materializada. Es decir, para cualquier grupo de valores positivos de posiciones fijas y de fuerzas externas dadas, existe un único grupo de coordenadas de nodos de la estructura en equilibrio.

Para realizar el análisis estático estructural, aplicando varios casos de cargas externas, las grandes áreas no tensadas se mantendrán fijas en cualquier paso del cálculo. Esto se puede lograr matemáticamente forzando las ecuaciones de materialización junto con las ecuaciones de equilibrio, razón por la cual el sistema de ecuaciones deja de ser lineal. Resolverlo directamente prueba, sin embargo, que es numéricamente estable, y así como las coordenadas para todos los nodos disponibles y los valores positivos o valores cero que pueden ser reforzados al aplicar técnicas de retardado (o dilación).

3. EL SISTEMA DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS TENSIONADAS DEL EASY

El sistema EASY está compuesto de tres submódulos. Esto se muestra esquemáticamente a continuación.

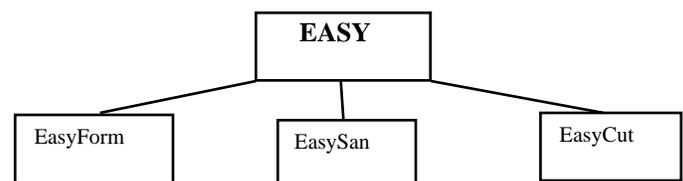


Figura 1

EasyForm comprende los programas usados para generar datos junto con la densidad de la fuerza al buscar la forma deseada. El **EasySan** se ocupa del análisis estático estructural de estructuras no lineales. El **EasyCut** posibilita generar los patrones de corte con alta precisión de los datos obtenidos con el **EasyForm**, y permite la recombinación para análisis subsecuentes de los patrones de corte partiendo del EasySan. (ver figura 1).

3.1. Flujo de Datos (flujogramas)

Cada una de las áreas del programa se organiza internamente en un número determinado de sub-programas autocontenidos que realizan tareas específicas bien definidas. El flujo de datos entre esos programas se logra a través del uso de un pequeño número de formatos especiales. Las vías (o los caminos) de flujo de datos por defecto, es posible ajustarlos a las necesidades particulares del usuario. En la figura 2 se muestran dos diagramas de flujo de datos que sirven para generar formas de superficies simples. Las herramientas de programas y archivos se representan por elipses y rectángulos respectivamente.

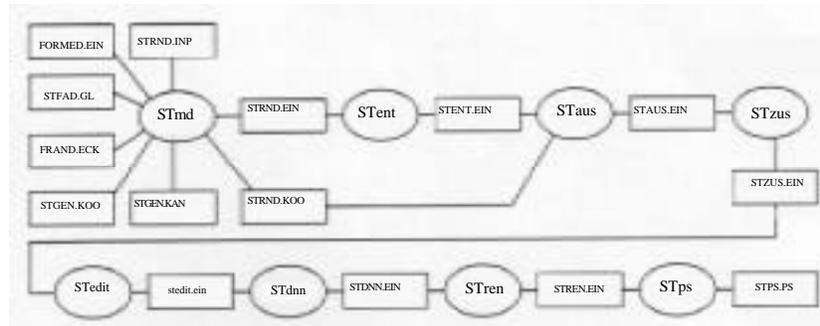


Figura 2(a). Diagrama de flujo de datos para generar formas de superficies simples

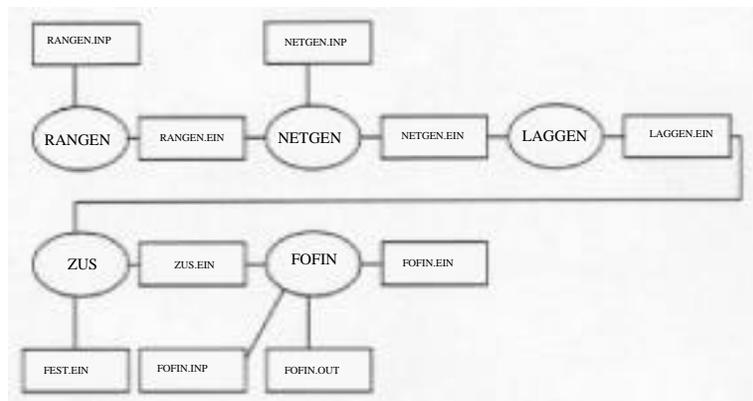


Figura 2(b). Diagrama de flujo de datos para generar formas de superficies simples.

4. EJEMPLOS DE GENERACION DE LA FORMA (Formfinding examples)

Los siguientes ejemplos se muestran para ilustrar varias características del programa en el área de generación de la forma. El primer ejemplo es una cubierta de forma irregular (irregular shade roof) que es la aplicación típica que sirve para presentar el escenario de diseño por defecto. La cubierta neumática también representa un diseño típico y que debido a las cargas de presión aplicadas requieren pasos adicionales específicos (pero que no será tratado en esta oportunidad). La última aplicación que veremos será el del punto elevado (high point roof).

4.1. Caso 1: Cubierta de Forma Irregular

La figura 3 muestra el plano de especificaciones de un proyecto de membrana estructural típico. Además de las coordenadas de los puntos de apoyo (o soporte) dados, la flecha del cable que funciona como relinga requiere tener una decima del largo de las cuerdas respectivas.

Esto se logra usando otra herramienta llamada **EasyNG**, que crea el archivo de salida para el generador de la malla **Netgen**. Para asegurar la suavidad (continuidad o forma suave) de las relingas o cables perimetrales (boundary cables), es necesario introducir elementos especiales que son los elementos que unen la malla interna con el borde límite externo de la relinga. Esto se logra usando el programa **Laggen**. Esto se mantiene antes de que el actual equilibrio de generación de la forma (o de la forma generada) pueda ser empezado (o iniciado) en combinación de la malla interna con la línea de relinga (o borde perimetral) y con la especificación de las posiciones nodales totalmente fijas. Este procedimiento se realiza con la herramienta **Zus** para crear el archivo **zus.ein** que se muestra en la figura 3 (c). En la figura 3(d) se muestra el resultado final de la forma buscada.

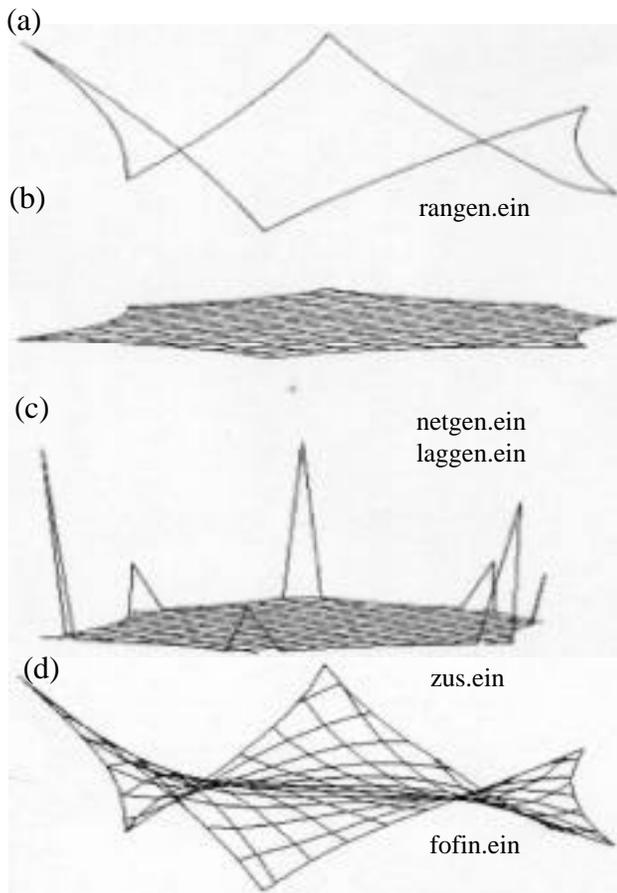


Figura 3. (a-d) Generación de la forma en una cubierta de forma irregular.

4.2. Caso 2: Puntos Elevados de la Cubierta

A diferencia del ejemplo anterior, para esta estructura se requiere mas de una red interna. Además, se emplean mallas radiales mas que 'cuadradas'. A esto, la complicación adicional principal es la inclusión de mástiles de compresión libre durante el procedimiento de generación de la forma tensada.

Los diferentes pasos a seguir para generar la malla y hallar la forma (form finding) de la estructura se muestran en la figura 4(a-f). El flujo de datos entre los principales programas para la generación del **zus.ein** se muestra principalmente en la figura 2. Debido a que se requiere de una estabilidad mucho mayor para soportar los mástiles, se empleó el editor gráfico del Windows **GedEIN** para ayudar a crear el archivo **fest.ein** con las coordenadas nodales fijas. Siguiendo la forma generada preliminar que simula los mástiles ya fijados (o ubicados), se añade el vínculo (o unión) de la malla con el mástil usando el **GedEIN**. Los resultados del procedimiento pueden apreciarse en las figuras 4(d) y 4(e) respectivamente. Siguiendo el proceso de liberación de los extremos de los mástiles con la forma definida (o diseñada), lo que resulta se muestra en la figura 4(f).

5. EJEMPLOS DE PATRONAJE

Los ejemplos presentados en el tema de patronaje se basan en el ejemplo de la Cubierta del Punto Elevado y en el de la Cubierta Neumática (problema que no abordaremos). Este último, por ser sinclástico

requiere puntos ubicados de forma convexa en donde la cubierta anticlástica del punto elevado requiere puntos ubicados en una forma concava.

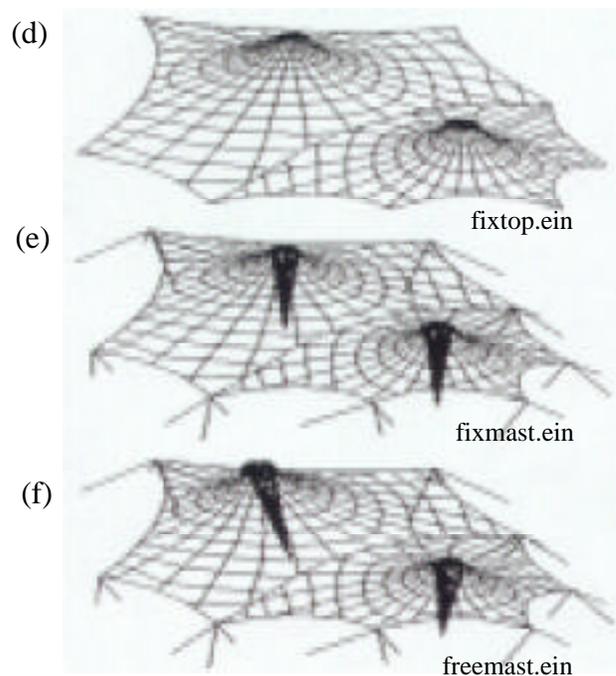
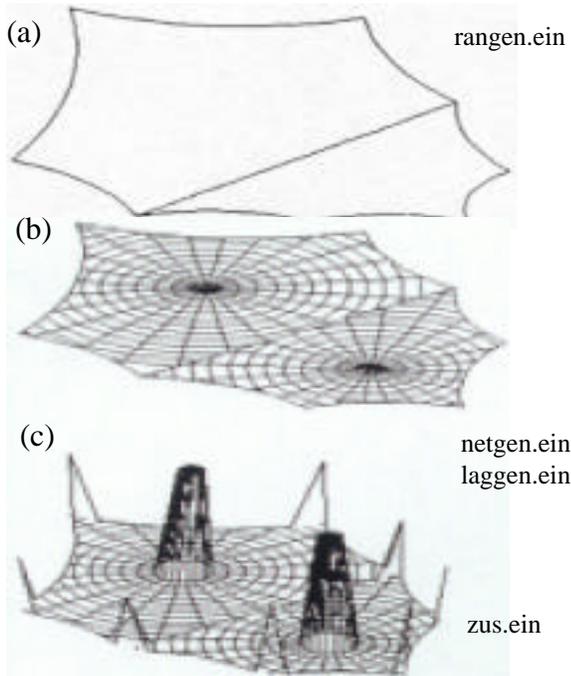


Figura 4. proceso de generación de la forma en el caso de los puntos elevados

Patrones en el caso del Punto Elevado

El procedimiento de generación de patrones en los modelos reales para estructuras de superficies de membranas implican técnicas laboriosas para llevar una línea geodésica al plano. Esto se logra a través de la proyección de una retícula sobre el modelo físico y posteriormente, la triangulación del resultado de esa proyección. Luego se toman las medidas reales de los vectores que forman los triángulos y se dibujan. Como en este proceso no se toman en cuenta los ángulos entre los vectores que forman esos triángulos, se producirá una distorsión en la ubicación de los vértices que al ser probada la hoja de papel sobre lo dibujado en la maqueta, estas no coincidirán lo que impondrá un proceso tedioso de mucha precisión en la corrección de las magnitudes de los vectores hasta que calcen perfectamente con lo dibujado en la maqueta (que es la proyección de la retícula de la que hablamos anteriormente). Esto se realiza poniendo y quitando los papeles con la impresión de los triángulos. Estos papeles, se generan y se corrigen las veces que sean necesarias hasta hallar las magnitudes apropiadas que nos permitan tener el aplanamiento de las curvas de forma controlada para luego poder imprimir los patrones a escala necesaria, y proceder a cortarlos.

En el programa los diferentes pasos a seguir para hallar los patrones es la fase que sigue al proceso de generar la forma y se muestra en las figuras 5 (a-c). El flujo de datos entre los programas principales es como se explicó anteriormente. Una vez identificado el borde perimetral y una vez calculada la normal de los vectores de los triángulos, la especificación de la línea geodésica se realiza usando el programa **Stfad**. En la Figura 5(a) se muestran los datos del borde perimetral de la malla (las líneas de relingas).

En la figura 5(b) se muestra el único ejemplo de las nuevas dos sub-superficies dimensionales desarrollables creadas de la superficie principal por el **STgen**. Seguidamente se cortan las sub-superficies y se aplanan, se remueve el elemento interno, siendo el resultado los patrones de corte que se muestran en la figura 5(c) y que denominamos **stent.ein**. El ajuste consiguiente se da con una compensación en pretensado, adelgazamiento del borde, y renombramiento de los puntos nodales al activar la secuencia **STaus**, **STedit**, **STdnn** y **STren** respectivamente. El resultado de este procedimiento se muestra en la figura 5(c). De forma alternativa, **STauto** se puede emplear para convertir el resultado generado en un archivo **DXF** de Autocad para imprimir los patrones y cortarlos. Uno de los programas más importantes en el **EASYCut** es el **STcon**, el cual maneja varios parámetros característicos de los datos referentes a los patrones de corte, tales como definir diferencias de longitud en los bordes de costura (o pegado) y las áreas de la tela.

Corriendo el **stent.ein**, **staus.ein**, **stedit.ein** y el **stdnn.ein** es posible mantener en el mínimo la ubicación y el nivel de distorsión de los patrones.

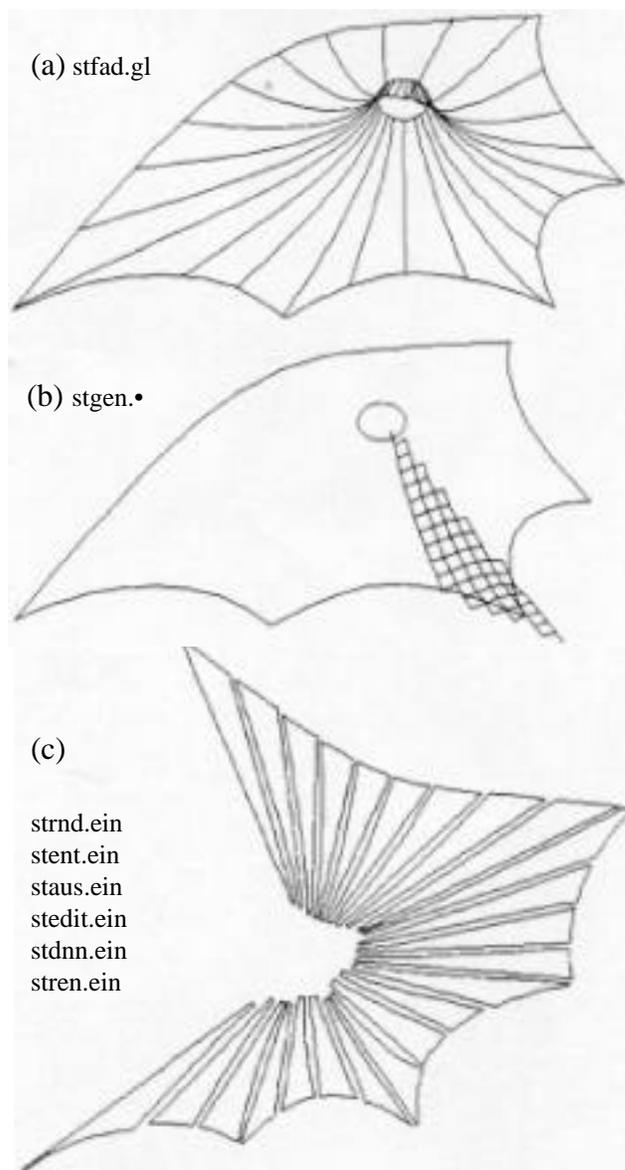


Figura 5. Proceso de generación de patrones de la estructura

CONCLUSION

Las herramientas informáticas como el **EASY** aceleran los procesos de generación de formas y determinación de las tensiones de las membranas y del patronaje. Esto da flexibilidad y agilidad a los procesos de diseño de las estructuras textiles, permite una mayor precisión en los procesos de cálculo y patronaje con el consecuente mejoramiento del resultado final (cubierta textil). El modelado virtual de estas estructuras nos facilita la comprensión de los fenómenos que actúan sobre las membranas de una forma más rápida y económica que los modelos físicos.

CRÉDITOS

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción-IDEC
Grupo ESTRAN MSc. Carlos Henrique Hernandez
Arq. Nelson Rodriguez
Asist. Invest. Antr. Paola Cano

Nombre del Programa: EASY-Form

Empresa Productora: TECHNET, Berlín, Alemania.

Financiamiento: Comisión de Estudios de Postgrado, FAU-UCV.
Maestría en Desarrollo Tecnológico de la Construcción

BIBLIOGRAFIA

- 1991 MONJO CARRIO, Juan. **Introducción a la Arquitectura Textil**. Madrid, Servicio de publicaciones del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid (COAM).
- 1996 ROBBIN, Tony. **Engineering a New Architecture. (Foreword by Stuart Wrede)**, Massachusets, Yale University Press.
- 1996 BERGER, Horst. **Lighth Structures, Structures of Light: The Art & Engineering of Tensile Architecture**, Switzerland, Birkhäuser Verlag für Architektur.
- 1997 SCHOCK, Hans-Joachim. **Soft Shells. Design & Technology of Tensile Architecture**. Berlin, Birkhäuser Press.
- 1998 Textile Roofs '98. **The Third International Workshop on the Design & Practical Realisation of Architectural Membrane Structures**. Prof.Dr.Ing.L.Gründig. Berlin, Technical University. June 18th-20th.

Ejemplos de utilización del sistema

