

DESARROLLO DE DOS HERRAMIENTAS PARA EL ANALISIS DE PANELES DE HONEYCOMB UTILIZANDO EL METODO DEL ELEMENTO FINITO

Elías Ledesma

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad de Guanajuato,
Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km. 3.5 + 1.8 Km. Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Gto., México.
Teléfono (464) 6479940 Ext. 2466.
elias@salamanca.ugto.mx

Salvador Aceves, Francisco Espinoza

Lawrence Livermore National Laboratory
7000 East Ave., Livermore, CA, CP 94551, United States of America
Teléfono (925) 4220864
aceves6@llnl.gov, espinosalozal@llnl.gov

RESUMEN

El presente trabajo trata sobre el desarrollo de un kit de herramientas para diseño y análisis de materiales compuestos. En este artículo se presentan dos utilidades para generar modelos de elemento finito de paneles de honeycomb, así la validación analítica de una de ellas y comparación entre las dos herramientas. Se utilizaron datos experimentales de paneles comerciales para el desarrollo de las herramientas. Se diseñaron también las interfaces gráficas.

ABSTRACT

This work discusses the development of a toolkit to perform design and analysis of composites. This paper presents two tools to create finite element honeycomb panel models, as well as validation by hand calculation of one of them, and also a comparison between the two tools. Experimental data is used to develop the toolkit. A graphical user interface is designed.

INTRODUCCIÓN

Recibe el nombre de material compuesto o composite todo aquel material que esta formado de dos o más componentes distinguibles físicamente y separables mecánicamente, presenta varias fases químicamente distintas, completamente insolubles entre sí y separadas por una interfase, y/o sus propiedades mecánicas son superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes (sinergia), [1].

Estos materiales nacen de la necesidad de obtener materiales que combinen las propiedades de los cerámicos, los plásticos y los metales. Por ejemplo en la industria del transporte son necesarios materiales ligeros, rígidos, resistentes al impacto y que resistan bien la corrosión y el desgaste, propiedades que rara vez se dan juntas. A pesar de haberse obtenido materiales con unas propiedades excepcionales, las aplicaciones prácticas se ven reducidas por algunos factores que aumentan mucho su costo, como la dificultad de fabricación o la incompatibilidad entre materiales. La gran mayoría de los materiales compuestos son creados artificialmente pero algunos, como la madera y el hueso, aparecen en la naturaleza. Los materiales compuestos se pueden dividir en tres grandes grupos: materiales compuestos reforzados con partículas, reforzados con fibras, y estructurales. El presente trabajo se refiere a estos últimos, y de manera específica a los paneles sándwich.

El panel sándwich mas comúnmente utilizado es el llamado de panal de abeja o honeycomb, el cual ha sido un concepto básico en la industria aeroespacial durante los últimos 40 años, sin embargo sus cualidades de bajo peso y alta rigidez, así como la versatilidad en el uso de materiales, a despertado el interés de otras industrias, como la del transporte, en donde los altos precios del combustible y el calentamiento global, han empujado al diseñador a buscar nuevas alternativas de materiales estructurales.

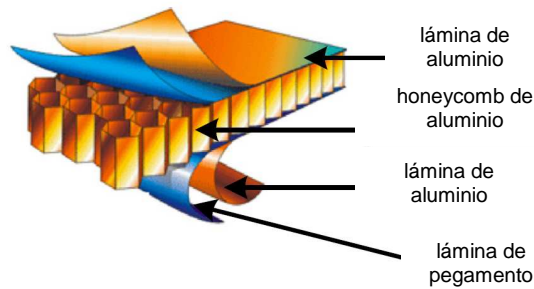


Fig. 1 Panel de honeycomb típico, [2].

El honeycomb está formado por tres componentes: las láminas exteriores, el alma, y el adhesivo entre el alma y las láminas exteriores, Fig. 1. Al pegar dos láminas delgadas a un alma de espesor significativamente mayor, se aumenta la rigidez a flexión del composite estructural. Así, las láminas exteriores resisten la mayor parte de las cargas en los extremos, así como los momentos flexionantes. La tarea del alma consiste en separar las láminas exteriores y transmitir el cortante entre ellas, por lo que la rigidez al cortante depende enteramente del alma. El adhesivo debe ser el adecuado para transmitir los esfuerzos entre las láminas y el alma, sin permitir deslizamiento. El tamaño de la celda en el alma es lo que proporciona las características de la misma, Fig. 2; celdas pequeñas incrementan la resistencia en el adhesivo, así como la resistencia al pandeo en las mismas, sin embargo el costo del panel también se incrementa. De manera general, se recomienda una relación de 10/1 entre el tamaño de la celda y el espesor de las caras exteriores, [3].

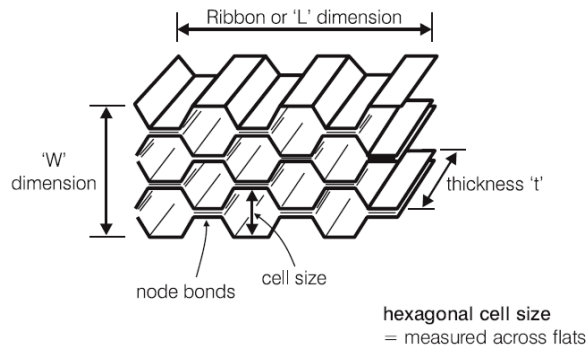


Fig. 2 Nomenclatura común del honeycomb, [4].

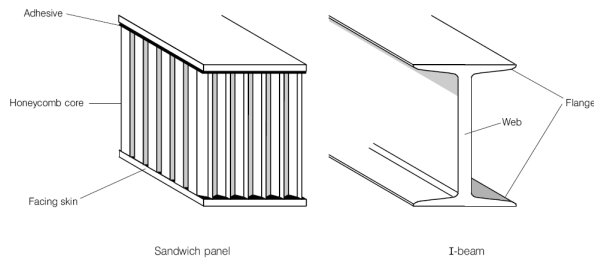


Fig. 3 Similitudes entre el panel de honeycomb y una viga I, [4].

Generalmente se analiza el composite tipo sándwich de la misma manera que se analiza una viga tipo I, Fig. 3, así las láminas o caras exteriores resisten la carga axial a tensión y/o compresión, y el alma resiste los esfuerzos cortantes y de compresión normales al panel. Así, al igual que para vigas a flexión, un parámetro muy importante es el modulo de rigidez a la flexión, solo que en este caso se extiende la teoría a una placa, de esta manera se tiene:

$$D = \frac{E}{12(1-\nu^2)} \left(\int_{-h/2}^{h/2} h^2 dh - \int_{-c/2}^{c/2} c^2 dc \right)$$

$$D = \frac{E}{12(1-\nu^2)} (h^3 - c^3)$$

en donde D es el modulo de rigidez a flexión para la placa, E el modulo de Young para el material de las láminas exteriores, ν es la relación de Poisson, y h es el espesor total de la sección del panel, y c es el espesor del alma, [3].

Además del módulo de rigidez a flexión de la placa D , es necesario conocer el modulo Young equivalente del alma, así como el modulo de elasticidad al cortante de la misma, los cuales generalmente son determinados experimentalmente para las diferentes configuraciones del alma. Los principales fabricantes de honeycomb proporcionan datos experimentales de las propiedades elásticas equivalentes de los paneles comerciales, Fig. 4. Sin embargo, si se quiere optimizar un composite estructural, es necesario contar con una herramienta que permita variar los parámetros y proporcionar una respuesta confiable sin necesidad de realizar costosas pruebas. Aquí es donde el diseñador recurre al uso del método del elemento finito (MEF) para elaborar modelos de composite estructurales, el cual nos da una aproximación más confiable que la simplificación de considerar el panel como una viga I.

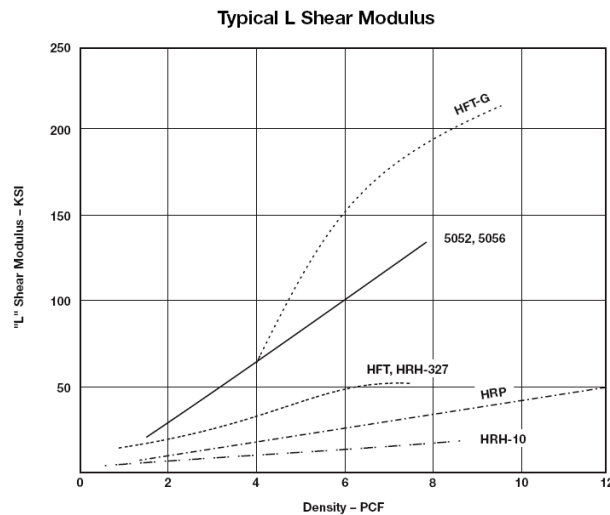


Fig. 4 Modulo a corte típico en la dirección L de paneles de honeycomb, [5].

Para realizar modelos estructurales en el MEF, principalmente se utilizan dos tipos de elementos, el elemento cascaron (SHELL) y el elemento sólido (SOLID). Dentro de los elementos SHELL se encuentran los elementos SHELL comunes y los elementos SHELL tipo sándwich, estos últimos simplifican el modelo, pero requieren las propiedades de cada componente del sándwich estructural.

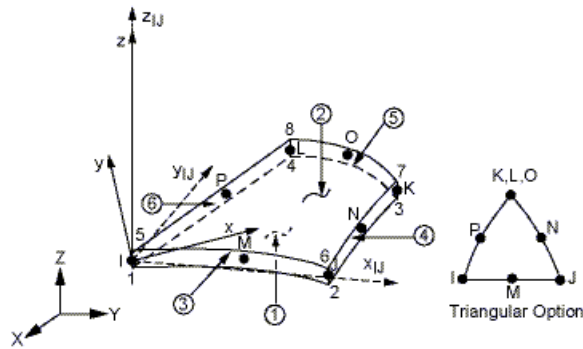


Fig. 5 Elemento SHELL convencional, [6].

En base a estos elementos se desarrollaron dos herramientas de análisis, la primera utiliza elementos sándwich para modelar el panel estructural, utilizando propiedades mecánicas equivalentes para cada componente. La segunda utiliza elementos SHELL comunes para modelar de manera detallada cada celda del honeycomb, así como las láminas exteriores. Las herramientas están escritas en el lenguaje Tk/Tcl, el cual es un lenguaje de programación para generar interfaces gráficas (GUI por sus siglas en inglés), y que se encuentra disponible de manera gratuita; el Tk/Tcl se desarrolló en la Universidad de California en Berkeley, con la filosofía de generar un lenguaje que sirviera de interfase entre diferentes softwares, sin depender de una licencia. Este lenguaje tiene la ventaja de que es transparente a la mayoría de los softwares comerciales, por lo que se puede utilizar para enlazar varios de ellos. Se pueden realizar programas completos en Tk/Tcl, pero en este caso se utilizó APDL (ANSYS parametric design language) para generar los modelos, y Tk/Tcl para la interfase gráfica.

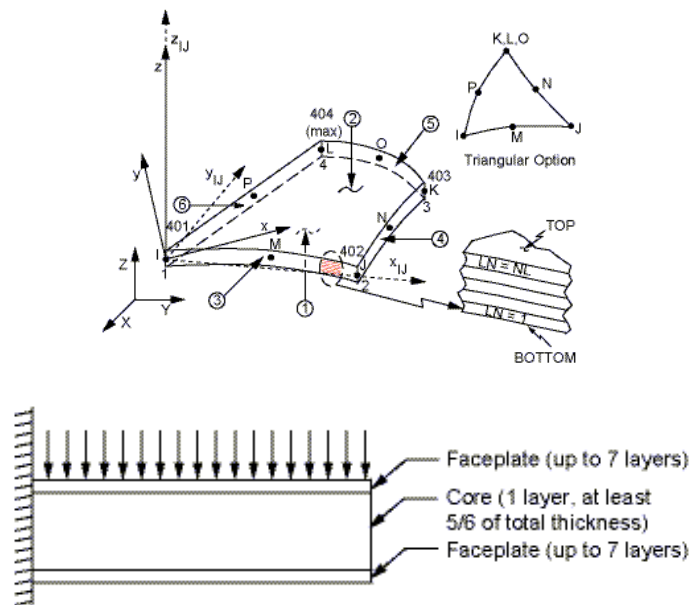


Fig. 6 Elemento SHELL tipo sándwich, [6].

En este trabajo se utilizó un software comercial de elemento finito (ANSYS), el cual es de uso común entre los diseñadores y analistas.

La herramienta de SHELL tipo sándwich esta basada en datos de las propiedades mecánicas de paneles de honeycomb producidos comercialmente por HEXCEL, en este caso para el aluminio 5056. A partir de los estos datos experimentales se encontraron ecuaciones polinomiales para los módulos de elasticidad correspondientes, así como las resistencias máximas correspondientes, Fig. 7. La variable de entrada es la densidad del alma del panel. En la Fig.8, se presenta la interfase gráfica de la herramienta, la cual se desarrolló en Tk/Tcl. La interfase gráfica generada es transparente a la interfase gráfica propia de ANSYS, y sigue el mismo formato del sistema operativo XP Windows.

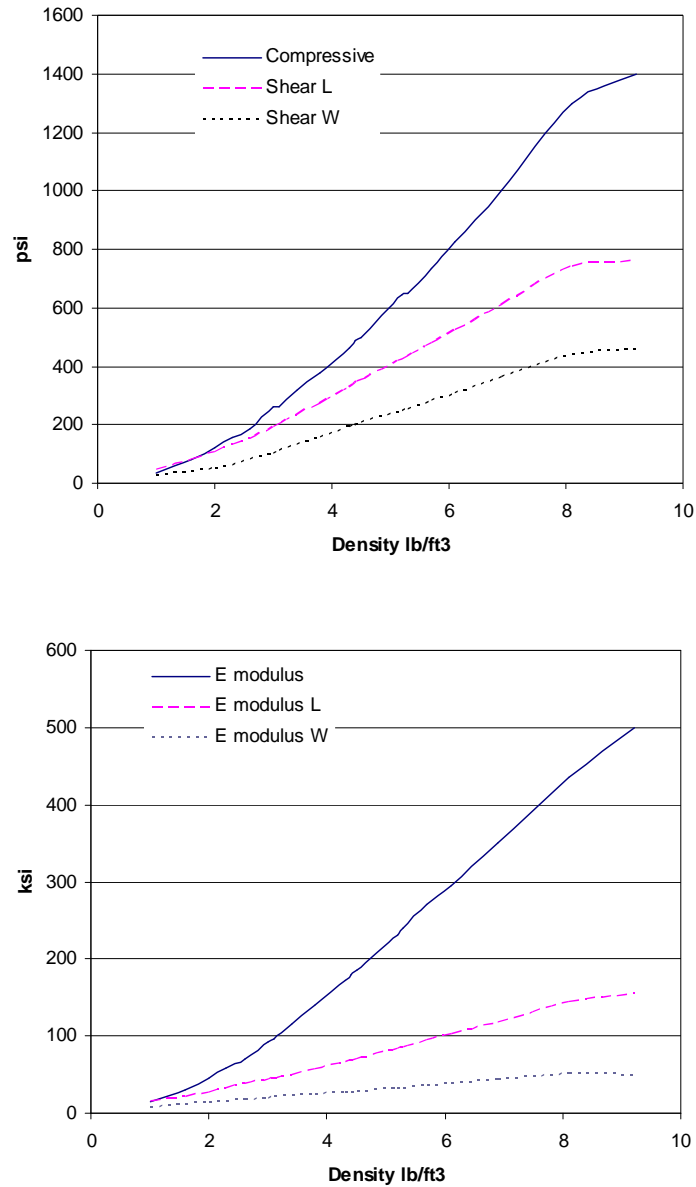


Fig. 7 Gráficas de las ecuaciones de regresión para los diferentes módulos.

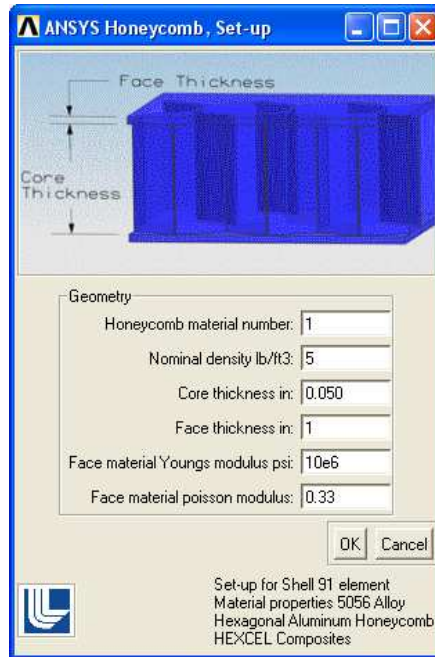


Fig. 8 Interfase gráfica para el elemento SHELL tipo sándwich.

En el caso de la herramienta que utiliza SHELL convencional, se modeló de manera individual cada lámina exterior, así como cada celda del alma, Fig. 9. La herramienta genera un panel de dimensiones dadas de manera automática. La interfase gráfica se desarrollo en Tk/Tcl.

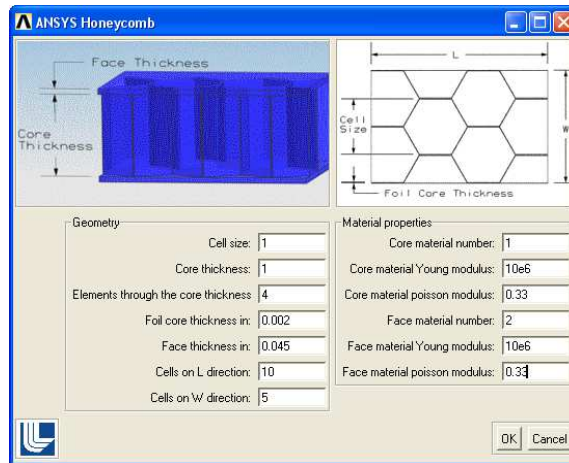


Fig. 9 Interfase gráfica para el elemento SHELL convencional.

Ejemplo

Se analizó una placa de honeycomb de 2 X 1 m, con las siguientes características, Fig. 10:

Láminas exteriores de aluminio 5251 H24:

Espesor 0.0005 m

Modulo de Young 70GPa

Módulo de Poisson 0.33

Alma de aluminio 3003:

Tamaño de celda 0.006 m

Densidad 83 Kg/m³

Espesor del alma 0.0254 m

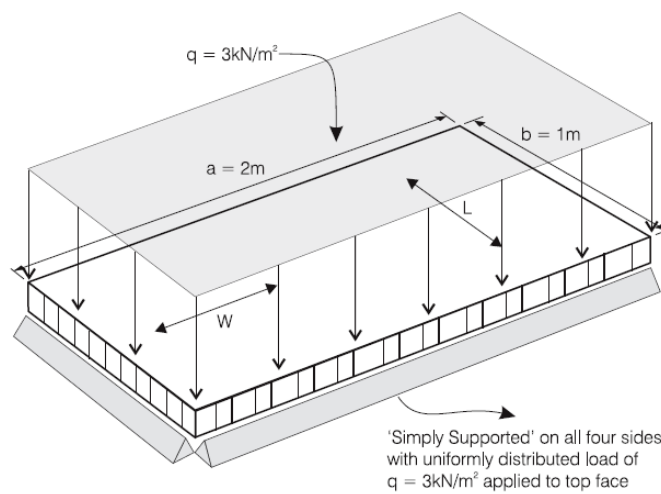


Fig. 10 Panel de 2 X 1 m, simplemente soportado en los extremos, con una presión en una cara de 3 kN/m², [HEXCEL, 4].

Analíticamente se obtiene que la deformación máxima de la placa es de 0.0024 m, el esfuerzo máximo en la placa es de 23.6 MPa, el esfuerzo cortante máximo en el alma es de 0.042 MPa, y el esfuerzo de compresión en la cara es 0.003 MPa, [4].

Para el modelo de elemento finito se utilizó la herramienta de SHELL tipo sándwich, y se modela un cuarto de la placa para aprovechar las condiciones de simetría, Fig.11.

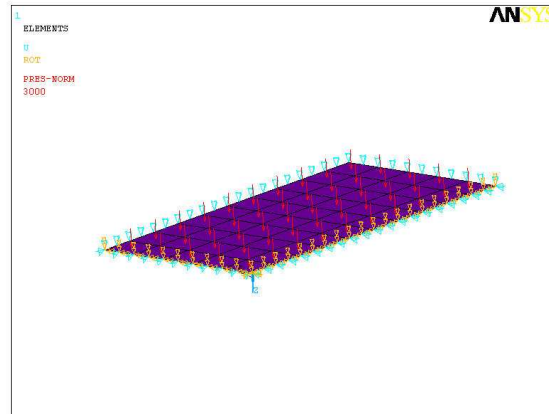


Fig. 11 Modelo de elementos finitos, con simetría, elemento SHELL tipo sándwich.

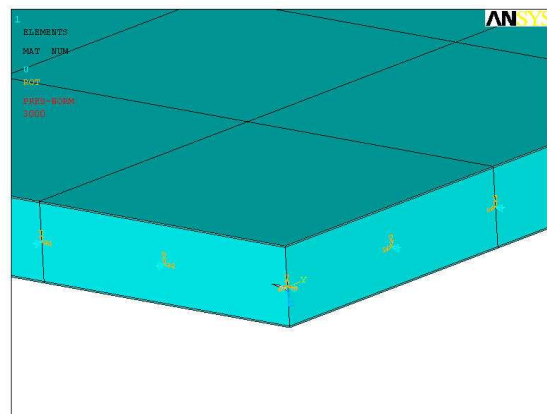


Fig. 12 Detalle del modelo de elementos finitos, donde se muestran el alma y las caras exteriores del panel.

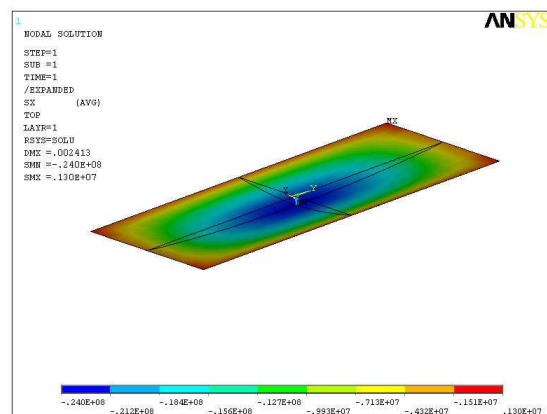


Fig. 13 Esfuerzos de una de las láminas exteriores en la dirección x.

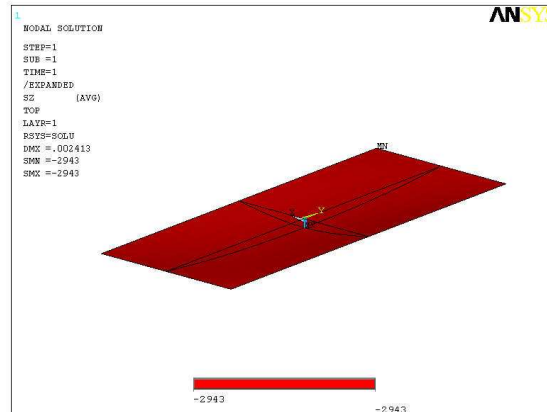


Fig. 14 Esfuerzos de una de las láminas exteriores en la dirección z (normales a la lámina).

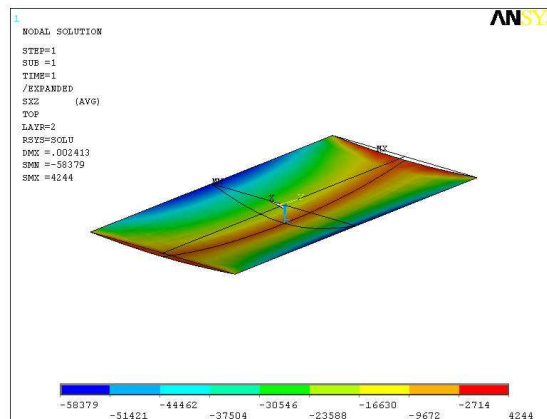


Fig. 15 Esfuerzos cortantes de una de las láminas exteriores en la dirección xz.

De los valores obtenidos podemos observar que el modelo se aproxima a los valores analíticos, Tabla 1.

Una vez verificada la herramienta de SHELL tipo sándwich, se procedió a comparar las dos herramientas. Sin embargo, por razones prácticas en cuanto al tamaño del modelo, se utilizó otro panel de honeycomb de dimensiones 19.48 in x 11.26 in, el cual se soporta de manera similar, pero la carga es de 10 psi, con las siguientes características:

Láminas exteriores de aluminio 5056

Espesor 0.045 in

Alma de aluminio 5056:

Tamaño de celda 3/8 in

Espesor de la lámina de honeycomb 0.002 in

Espesor del alma 0.25 in.

Para este panel se generaron entonces dos modelos de elemento finito, uno con elementos SHELL tipo sándwich, y uno con elementos SHELL convencionales, y se compararon los desplazamientos y los esfuerzos, figs. 17-21.

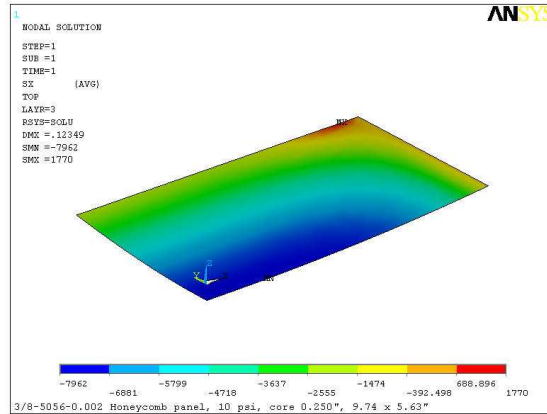


Fig. 16 Esfuerzos en x de la lámina superior, SHELL tipo sándwich.

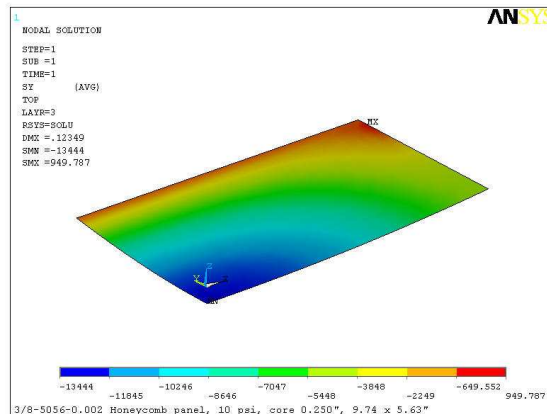


Fig. 17 Esfuerzos en y de la lámina superior, SHELL tipo sándwich.

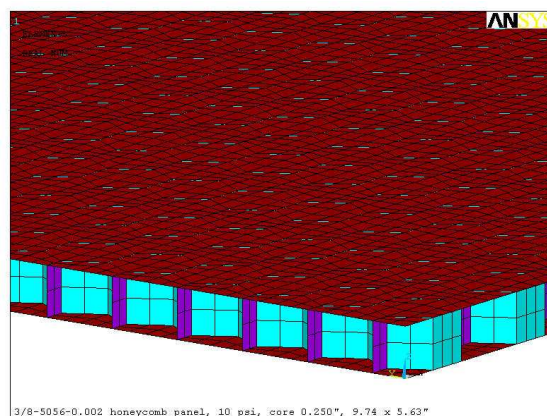


Fig. 18 Modelo del panel utilizando SHELL convencional.

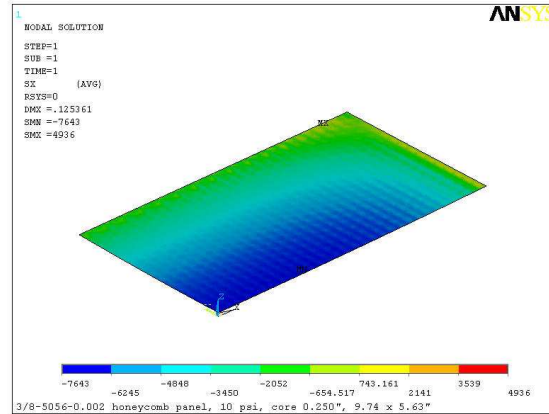


Fig. 19 Esfuerzos en x de la lámina superior, SHELL convencional.

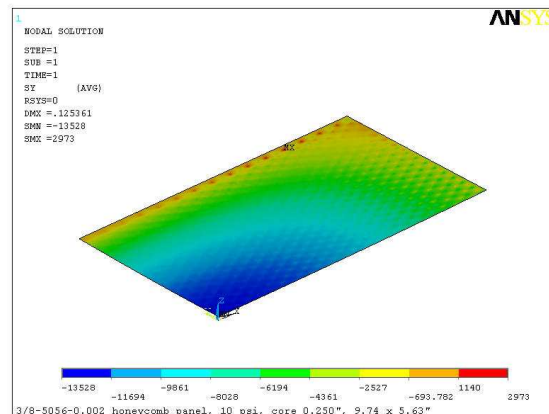


Fig. 20 Esfuerzos en y de la lámina superior, SHELL convencional.

Para calcular la resistencia del panel honeycomb utilizando elementos tipo sándwich es necesario calcular la resistencia equivalente del panel. Para ello se obtuvieron también ecuaciones de regresión polinomial con datos provistos por el fabricante. En el caso del modelo con SHELL convencional, la resistencia del panel se obtiene calculando directamente los esfuerzos de los diferentes componentes del panel, con la resistencia correspondiente del material, Fig. 21.

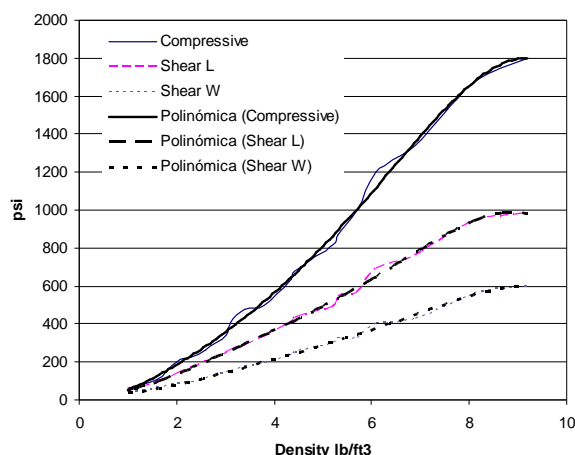


Fig. 21 Gráficas de las ecuaciones de regresión para las resistencias del honeycomb.

DISCUSIÓN GENERAL.

Los valores de los esfuerzos y deformaciones de la verificación de la herramienta de SHELL tipo sándwich se presentan en la tabla 1.

Tabla 1 Verificación de la herramienta de SHELL tipo sándwich.

	Valor teórico	FEA
Desplazamiento Max	0.0024 m	0.002413 m
Esfuerzo en x Max	23.6 MPa	24 MPa
Esfuerzo de compresión	0.003 MPa	0.002943 MPa

Se puede observar de la tabla 1, que la herramienta se ajusta a los valores teóricos calculados, sin embargo a simple vista se presenta una diferencia entre el valor calculado de los esfuerzos cortantes por medio de la herramienta y el valor calculado analíticamente, los cuales ocurren en diferentes planos, Fig. 15.

Se presentan los resultados del segundo ejemplo de comparación en la tabla 2. Se observa que los resultados se aproximan considerablemente. La diferencia entre las dos herramientas es el tiempo de cómputo y los detalles en los esfuerzos. En el caso del modelo de SHELL convencionales el modelo nos da mas detalle, pero el tamaño del mismo es de al menos 100 veces el tamaño en MBytes del modelo de SHELL tipo sándwich.

Tabla 2 Comparación de la herramienta de SHELL tipo sándwich y SHELL convencional.

	SHELL Sándwich	SHELL Convencional
Desplazamiento Max	0.12349 in	0.12536 in
Esfuerzo en x Max	7962 psi	7643 psi
Esfuerzo en y Max	13444 psi	13528 psi
Tiempo de cómputo	15 seg	300 seg

CONCLUSIONES

Se desarrollaron dos herramientas para realizar análisis de paneles de honeycomb por medio del método del elemento finito. Se verificó una de las herramientas con datos provistos por un fabricante de paneles de honeycomb, además de realizó una comparación entre las dos herramientas generadas. Dichas herramientas se elaboraron diseñando una interfase gráfica, la cual facilita el uso de las mismas y la interfase es amigable al usuario, y debido a que la interfase gráfica se desarrollo en Tk/Tcl, no es necesario comprar software adicional, ya que este es freeware.

En el caso de análisis para diseños con paneles de honeycomb la herramienta que utiliza el SHELL tipo sándwich es computacionalmente más eficiente. Sin embargo si se quiere optimizar el honeycomb, se pueden realizar análisis detallados del mismo utilizando la herramienta de SHELL convencional, con el costo de tiempo de computo adicional. Otra ventaja de utilizar esta última herramienta es que es necesaria únicamente la resistencia del material para calcular el factor de seguridad del panel. En el caso del SHELL tipo sándwich es necesario utilizar las resistencias equivalentes del honeycomb.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Pernich, A., Flores, F., “Modelado de la inestabilidad de sólidos celulares en compresión”. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 20, 1,3-18, 2004.
- [2] Belouettar, S., Abbadi, A. “Experimental investigation of static and fatigue behavior of composites honeycomb materials using four point bending tests”. Journal of Composite Structures, 2008.01.015, 2008.
- [3] Faupel, J., Fisher, F., “Engineering Design”, John Wiley&Sons Inc., 1981.
- [4] “HexWeb Honeycomb sandwich design technology”, HEXCEL Composites, Duxford. 2000.
- [5] “HexWeb Honeycomb attributes and properties”, HEXCEL Composites, Duxford. 1999.
- [6] ANSYS Inc., “Theoretical manual”, ANSYS.