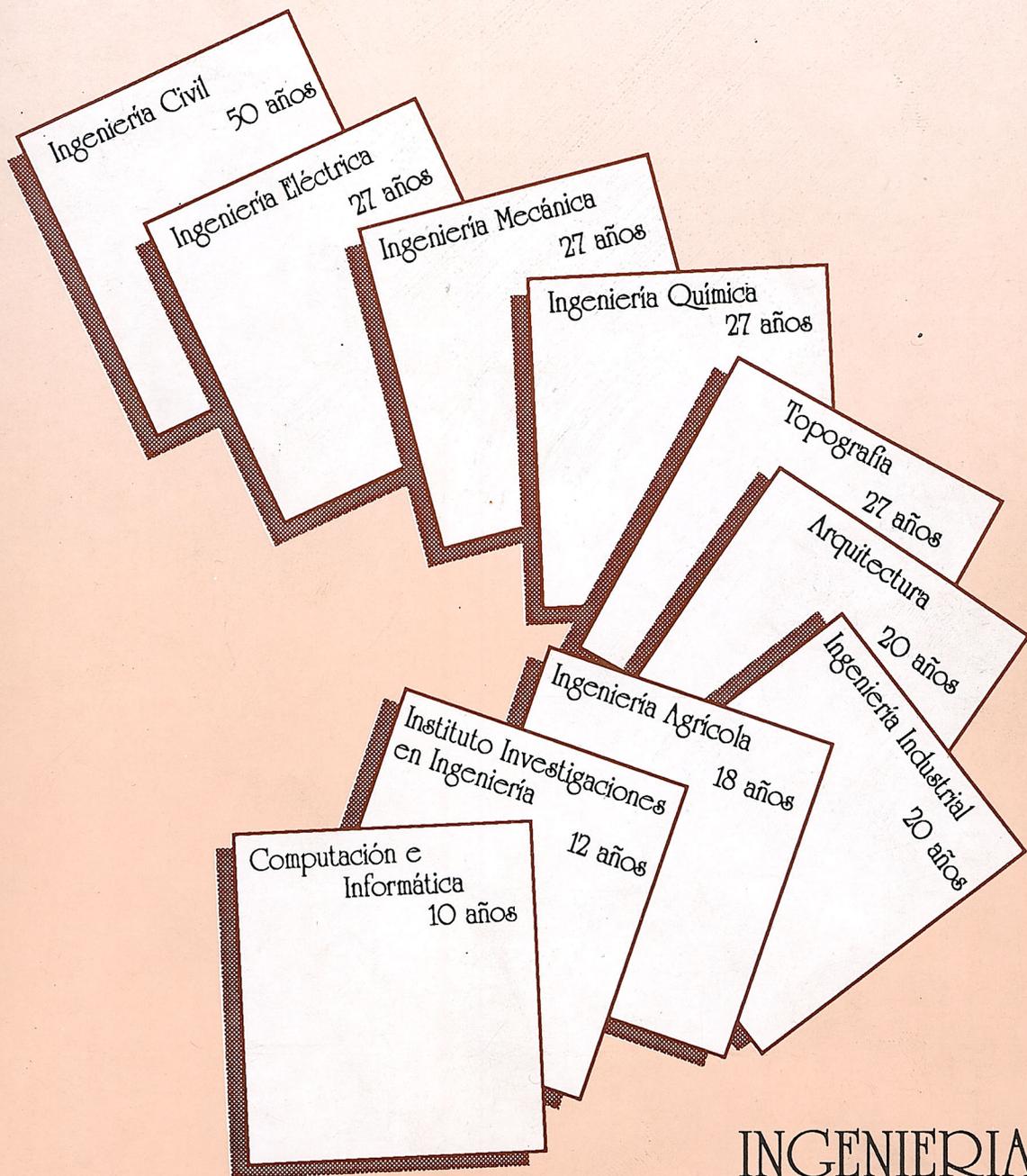


Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
JULIO/DICIEMBRE 1991 VOLUMEN 1 Nº2



INGENIERIA
1991

COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS DE METAL EXPANDIDO SOMETIDOS A FLEXIÓN

Ing. Alejandro Pacheco Molina. M.Sc. *

Resumen

En este artículo se presenta un estudio sobre el comportamiento elástico de tres tipos diferentes de láminas de metal expandido bajo cargas de flexión. Se investigó experimentalmente la relación entre carga, deflexión máxima y distancia entre apoyos para cada tipo de lámina actuando como viga simplemente apoyada. Se aplicaron dos sistemas de carga diferentes: carga concentrada a mitad del claro y carga uniformemente distribuida. También se determinó experimentalmente la resistencia de fluencia de cada lámina por medio de pruebas de flexión en muestras llevadas hasta la deformación plástica. Se observó que la teoría convencional de la flexión no predice con suficiente exactitud la deflexión que experimentan las láminas de metal expandido, por lo que fue necesario desarrollar una ecuación experimental que relacionara adecuadamente los datos de carga, deflexión y claro para cada tipo de lámina. Finalmente, como resultado de máximo interés, se presenta una tabla que especifica para cada tipo de lámina los valores de carga admisible y deflexión en función del claro, la cual es muy útil como tabla de diseño y selección.

Summary

This paper presents a study about the elastic behavior of three different types of expanded metal sheets subjected to bending forces. The relationship among load, maximum deflection and span for each type of sheet, acting as a simple supported beam, was investigated experimentally. Two different types of loads were applied: concentrated load at the middle of the span and uniformly distributed load. Also, the yield strength of each type of sheet was determined experimentally by means of bending tests performed over specimens loaded to plastic deformation. It was observed that the conventional bending theory does not predict the deflection of the expanded metal beams with enough accuracy, therefore it was necessary to develop an experimental equation for relating data of load, deflection and span for each type of sheet. Finally, as a main result, there is a useful table for designing and selecting elements made of any type of the expanded metals that were tested. The table shows values of maximum allowable load, corresponding deflection and span for a safe design.

1. INTRODUCCION

El metal expandido se forma a partir de una lámina sólida de metal, la cual es expandida hasta diez veces su tamaño original por medio de un proceso mecánico de corte y estirado. El producto resultante tiene la apariencia de una malla con orificios uniformes de forma romboidal, su superficie es rugosa o sobrepuesta, su peso específico es hasta un 80% menor que la lámina original y su rigidez es aumentada notablemente. El metal expandido puede ser sometido adicionalmente a un

proceso de laminado en frío con rodillos con lo cual se consigue una lámina de superficie plana y lisa, útil para ciertas aplicaciones, aunque con ello se pierde rigidez a la flexión.

Por sus características geométricas y su elevada relación de rigidez a peso, las láminas de metal expandido se han convertido en un material importante para el ingeniero. Algunas aplicaciones típicas del metal expandido se encuentran en la construcción de pisos industriales abiertos que permitan visibilidad y ventilación como en las refineras, también para confeccionar escaleras, pasarelas, plataformas, paneles para estanterías abiertas; como alma para piezas de concreto ar-

* Escuela de Ingeniería Mecánica Universidad de Costa Rica

mado, como material para la fabricación de cribas de máquinas agrícolas y otros elementos similares. Adicionalmente se dan múltiples usos a los metales expandidos con fines arquitectónicos, ornamentales o decorativos.

Para el diseño de elementos estructurales hechos de metal expandido, tales como pisos o pasillos, el ingeniero requiere disponer de especificaciones técnicas del producto que le permitan calcular la resistencia de dichos elementos bajo diversos estados de cargas. Con el fin de proporcionar tales especificaciones para los tipos de carga más comunes (carga concentrada y carga uniformemente distribuida), se realizó un estudio sobre el comportamiento de varias muestras de metal expandido sujeto a flexión por cargas transversales. Todas las muestras fueron proporcionadas por una empresa costarricense que las fabrica y que supe de este producto al mercado local. A pesar de que la empresa produce más de una docena de estilos o tipos de metal expandido y que los ofrece en acero ordinario, acero inoxidable y aluminio, en este trabajo se estudiaron solamente los tres estilos de mayor interés para usos estructurales y confeccionados de acero al carbón laminado en frío, clasificación JIS-G-3141-SPC-SD.

En este artículo se resumen los principales resultados experimentales hallados en las mencionadas pruebas, así como la información más útil para el diseño y selección de elementos de metal expandido. Cabe mencionar que los ensayos de flexión se realizaron aprovechando las facilidades de equipo del Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales de la Escuela de Ingeniería Civil, así como el Taller y Laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica.

1.1 Objetivos del estudio

Conforme a lo mencionado, se efectuaron estudios para determinar la resistencia a la flexión de tres modelos o estilos de láminas de acero de metal expandido (designados por el fabricante como estilos 1, 2, y 14). Los objetivos específicos del estudio realizado para cada estilo de lámina fueron los siguientes:

- 1.- Determinar experimentalmente los valores de carga y deflexión correspondientes a la condición de fluencia inminente para diferentes valores de claro.

- 2.- Determinar experimentalmente las curvas de carga contra deflexión en ámbito elástico para cargas concentradas y cargas uniformemente distribuidas bajo distintos valores de claro (distancia entre apoyos).
- 3.- Confeccionar una tabla de especificación de carga segura (concentrada y uniforme) y deflexión en función del claro de diseño.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Se consultaron las normas de la ASTM (American Society for Testing and Materials) [1] y no se encontró ninguna norma específica para metales expandidos, ni otras que se le pudieran aplicar por analogía.

Por lo tanto, para lograr los objetivos planteados anteriormente, se desarrollaron técnicas y montajes de laboratorio de acuerdo con la siguiente metodología experimental.

2.1 Determinación del momento flector de fluencia.

Para evaluar experimentalmente el comportamiento elástico y plástico del metal expandido, se sometieron 4 muestras de cada estilo de lámina a pruebas de flexión con carga concentrada en línea a mitad del claro. De esta manera se ensayaron un total de 12 muestras en una máquina especial para este tipo de pruebas. Se registraron datos de carga y deflexión tanto en el ámbito elástico, como en el plástico, llevando las muestras hasta el colapso por fluencia avanzada.

Las gráficas de carga contra deflexión obtenidas con estos datos permitieron identificar los valores de carga y deflexión críticos correspondientes a la condición de fluencia inminente en cada una de las 12 muestras (punto de cedencia).

2.2 Determinación de las curvas carga deflexión en ámbito elástico bajo carga concentrada en línea.

Para evaluar la capacidad de carga segura (sin provocar deformación permanente) de cada estilo de lámina, y a la vez conocer la relación carga-deflexión, se realizaron diversos ensayos de flexión en ámbito elástico sobre una misma muestra de cada lámina. Se registraron datos de carga y deflexión para cuatro valores distintos de claro en cada muestra. Las cargas utilizadas fueron pesos de plomo calibrados coloca-

dos linealmente a lo ancho de la lámina en la zona central. Los datos obtenidos permitieron obtener la pendiente de la relación carga - deflexión para cada ensayo.

2.3 Determinación de las curvas carga-deflexión en ámbito elástico bajo carga uniformemente distribuida

Se realizaron ensayos de flexión bajo carga uniformemente distribuida con el propósito de evaluar la relación carga-deflexión dentro del ámbito elástico del material. Para ello se utilizaron las mismas muestras de los ensayos con carga concentrada. Nuevamente se registraron valores de carga neta aplicada y deflexión para cuatro valores de claro en cada una de las muestras. La carga uniforme se logró colocando pesos calibrados distribuidos uniformemente sobre la superficie de la lámina. Se obtuvieron excelentes resultados utilizando envases plásticos conteniendo un volumen determinado de agua. Variando el volumen de agua se controló el valor de la carga distribuida. Los datos obtenidos en estos ensayos

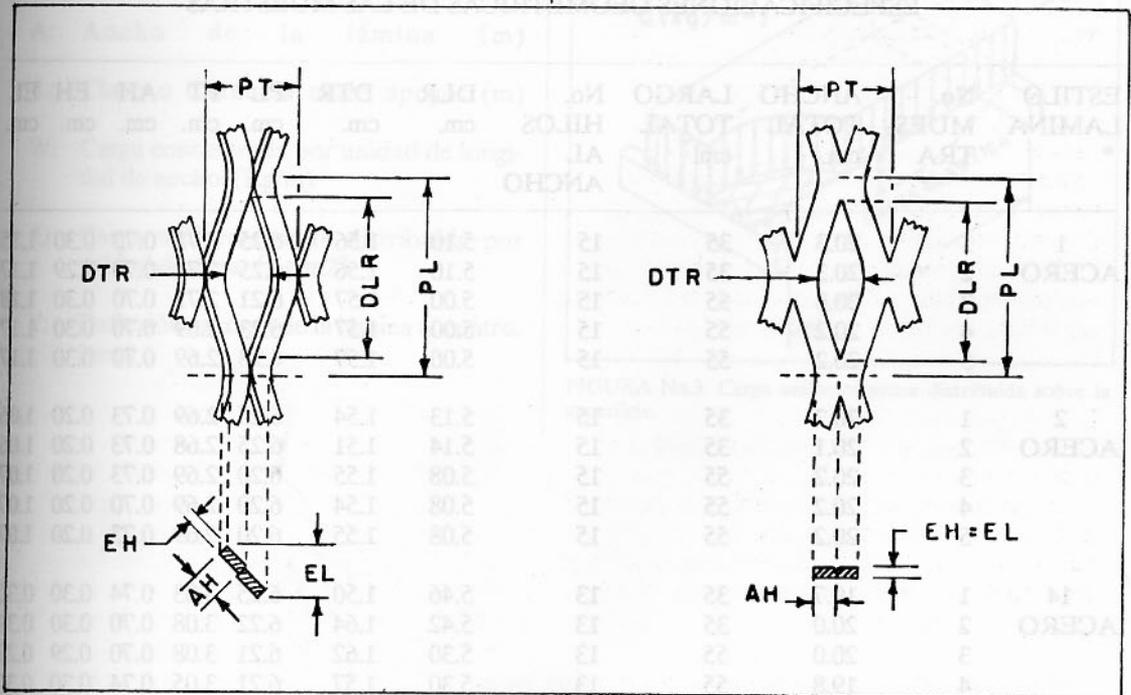
se utilizaron para obtener la pendiente de la relación carga - deflexión en cada caso.

3. ESPECIFICACIONES GEOMETRICAS DE LAS MUESTRAS

Considerando que las propiedades de resistencia y de rigidez de las láminas de metal expandido dependen fundamentalmente de sus dimensiones geométricas características, fue necesario medir estas últimas para cada una de las muestras utilizadas. Es necesario advertir que los resultados obtenidos en las pruebas de flexión así como la tabla de carga segura que se presentan en este artículo son aplicables única y exclusivamente a láminas de metal expandido que posean exactamente las mismas características geométricas que las muestras empleadas en este estudio.

3.1 Nomenclatura y definición de medidas características

En la figura No. 1 se muestran los parámetros geométricos característicos que se utilizarán en este estudio para especificar la constitución geo-



a). Acabado sobrepuesto.

b). Acabado liso (aplanado).

FIGURA No. 1. Parámetros geométricos característicos de láminas de metal expandido

métrica de cada una de las muestras. Dichos parámetros se definen a continuación:

- DLR: Diagonal longitudinal del rombo.
(coincide con la diagonal mayor)
DTR: Diagonal transversal del rombo.
(coincide con la diagonal menor)
PL: Paso longitudinal
PT: Paso transversal
AH: Ancho del hilo
EH: Espesor del hilò
EL: Espesor de la lámina expandida

Se define como "hilo" de la lámina al filamento metálico de sección rectangular que separa los espacios abiertos romboidales del metal expandido. De esta manera se puede decir que la lámina está constituida por un conjunto de hilos continuos en la dirección longitudinal y doblados en forma de zigzag.

Se entiende por dirección longitudinal aquella que coincide con la diagonal mayor de los rombos o con el "flujo" de los rombos. La direc-

ción transversal es aquella que coincide con la diagonal menor de los rombos. De esta manera las direcciones longitudinal y transversal forman un sistema de ejes perpendiculares que resulta muy apropiado para especificar las dimensiones del metal expandido.

3.2 Dimensiones de las muestras usadas

Todas las pruebas de flexión se realizaron bajo el sistema de viga soportada en dos apoyos simples. Los apoyos se colocaron perpendicularmente a la dirección longitudinal de las láminas, por cuanto de esta manera se aprovecha su máxima rigidez y resistencia. Todas las muestras tienen forma rectangular con sus lados ancho y largo paralelos a las direcciones transversal y longitudinal respectivamente. En la *tabla No. 1* se presentan las dimensiones de las muestras empleadas en cada prueba. Las muestras 1,2,3 y 4 de cada estilo se utilizaron en las pruebas para determinar el momento flector de fluencia (descritas en 2.1). Por otro lado, las muestras 5 se reservaron exclu-

TABLA No. 1.
ESPECIFICACIONES GEOMETRICAS DE LAS MUESTRAS

ESTILO LAMINA *	No. MUES- TRA	ANCHO TOTAL cm.	LARGO TOTAL cm.	No. HILOS AL ANCHO	DLR cm.	DTR cm.	PL cm.	PT cm.	AH cm.	EH cm.	EL cm.
1 ACERO	1	20.3	35	15	5.10	1.56	6.25	2.71	0.70	0.30	1.15
	2	20.3	35	15	5.10	1.56	6.25	2.71	0.70	0.29	1.17
	3	20.3	55	15	5.00	1.57	6.21	2.71	0.70	0.30	1.18
	4	20.2	55	15	5.00	1.57	6.23	2.69	0.70	0.30	1.17
	5	20.2	55	15	5.00	1.57	6.23	2.69	0.70	0.30	1.17
2 ACERO	1	20.2	35	15	5.13	1.54	6.25	2.69	0.73	0.20	1.06
	2	20.1	35	15	5.14	1.51	6.25	2.68	0.73	0.20	1.06
	3	20.2	55	15	5.08	1.55	6.20	2.69	0.73	0.20	1.07
	4	20.2	55	15	5.08	1.54	6.20	2.69	0.70	0.20	1.07
	5	20.2	55	15	5.08	1.55	6.20	2.69	0.73	0.20	1.07
14 ACERO	1	19.7	35	13	5.46	1.50	6.25	3.03	0.74	0.30	0.30
	2	20.0	35	13	5.42	1.64	6.22	3.08	0.70	0.30	0.30
	3	20.0	55	13	5.30	1.62	6.21	3.08	0.70	0.29	0.29
	4	19.8	55	13	5.30	1.57	6.21	3.05	0.74	0.30	0.30
	5	19.8	55	13	5.30	1.57	6.21	3.05	0.74	0.30	0.30

* Los estilos de lámina 1 y 2 tienen acabado sobrepuesto y el estilo 14 es aplanado.

sivamente para las pruebas de carga - deflexión en ámbito elástico (descritas en 2.2 y 2.3).

4. ANALISIS TEORICO DE LA FLEXION

La obtención de las especificaciones de carga segura para los metales expandidos actuando como vigas simplemente apoyadas bajo distintos valores de claro, requieren de un análisis cuidadoso de los resultados experimentales, a fin de que estos tengan un carácter predictivo confiable. Conforme a esta premisa de confiabilidad, fue necesario adecuar algunos aspectos de la teoría convencional de la flexión con el fin de ajustarla al comportamiento experimental del metal expandido. Para dar especificaciones de diseño, útiles en el cálculo estructural, se consideraron dos formas típicas de carga sobre láminas de metal expandido simplemente apoyadas: (a) carga concentrada en línea a mitad del claro y (b) carga uniformemente distribuida sobre toda la superficie de la lámina. En las figuras No. 2 y No. 3 se ilustran estas dos condiciones de carga respectivamente y además se establece la siguiente nomenclatura:

- A: Ancho de la lámina (m)
- L: Claro o distancia entre apoyos (m)
- W: Carga concentrada por unidad de longitud de ancho. (Kg/m)
- Q: Carga uniformemente distribuida por unidad de área. (Kg/m²)
- Y: Deflexión máxima de la lámina al centro. (mm)

En el siguiente apartado se presenta un breve resumen de las fórmulas teóricas aplicadas en este estudio.

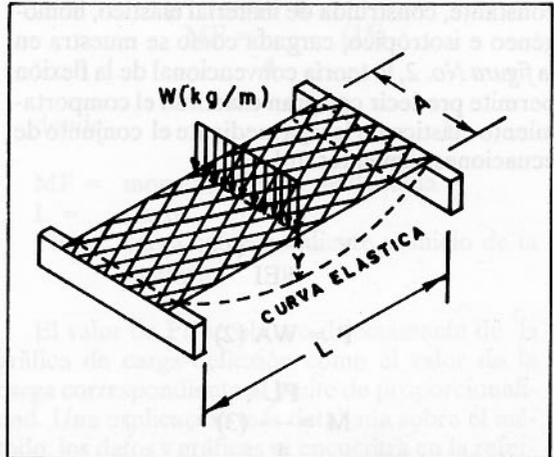


FIGURA No. 2. Carga concentrada en línea a lo ancho de lámina.

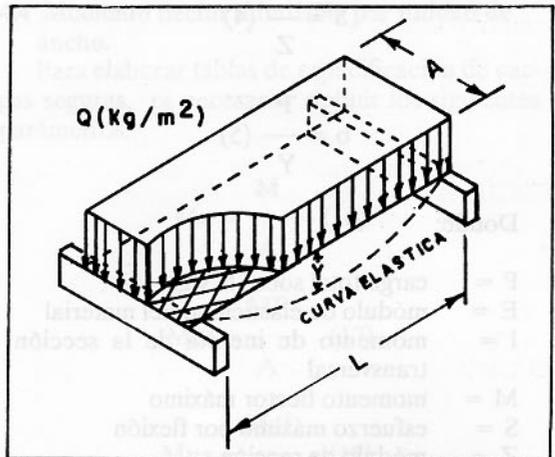


FIGURA No.3. Carga uniformemente distribuida sobre la superficie.

4.1 Flexión bajo carga concentrada por unidad de ancho

En el caso de una viga de sección transversal constante, construida de material elástico, homogéneo e isotrópico, cargada como se muestra en la figura No. 2, la teoría convencional de la flexión permite predecir con gran exactitud el comportamiento elástico de la viga mediante el conjunto de ecuaciones siguientes: [6]

$$Y = \frac{PL^3}{48EI} \quad (1)$$

$$P = WA \quad (2)$$

$$M = \frac{PL}{4} \quad (3)$$

$$S = \frac{M}{Z} \quad (4)$$

$$b = \frac{P}{Y} \quad (5)$$

Donde:

- P = carga total sobre la viga
- E = módulo de elasticidad del material
- I = momento de inercia de la sección transversal
- M = momento flector máximo
- S = esfuerzo máximo por flexión
- Z = módulo de sección
- b = pendiente de la curva carga-deflexión en ámbito elástico, se le llamará "constante elástica de la viga".

Al combinar las ecuaciones (1) y (2), se obtiene:

$$\frac{WL^3}{Y} = \frac{48EI}{A} = K \quad (6)$$

El término K es un coeficiente indicador de la rigidez a la flexión de la viga, cuyo valor depende del tipo de carga aplicada, del módulo elástico del material, del momento de inercia y del ancho de

la viga. Se observa que para el caso de vigas ideales (continuas, homogéneas, isotrópicas, sección constante) el coeficiente K es una constante para un tamaño dado de sección. Como se verá más adelante, se logró determinar experimentalmente que las láminas de metal expandido no se comportaron como vigas perfectas o ideales, ya que su coeficiente de rigidez K no se mantiene constante para una misma lámina, sino que experimenta una apreciable variación con la longitud del claro. Este hecho no es sorprendente desde un punto de vista analítico si se considera la compleja constitución del metal expandido, en el cual la sección transversal está formada por múltiples hilos cuya forma y posición relativa cambian a lo largo de la dirección longitudinal de la lámina. Obviamente esta compleja geometría del metal expandido produce un patrón de deformación algo diferente al de una viga ordinaria. Para lograr una ecuación predictiva confiable que relacione carga, claro y deflexión, similar a la ecuación (6), se registraron suficientes datos experimentales para obtener gráficamente la variación de K en función de L para las distintas muestras del material ensayado. De esta manera se logró confeccionar una ecuación teórico-experimental para predecir el comportamiento elástico de los tres modelos o estilos de metal expandido que fueron ensayados. Combinando las ecuaciones (2), (5) y (6), el coeficiente K puede expresarse como sigue:

$$K = \frac{bL^3}{A} \quad (7)$$

En el laboratorio se registraron datos de carga total y deflexión, para cuatro valores preestablecidos de claro, en cada una de las muestras. Luego el valor de b se obtuvo calculando la pendiente de la relación carga-deflexión mediante un análisis computarizado de regresión lineal de los datos. Los resultados de estos cálculos se discutirán y analizarán en la sección 5 de este artículo.

4.2 Flexión bajo carga uniformemente distribuida.

Una viga teórica o ideal cargada como se muestra en la figura 3, posee un comportamiento elástico regido por el conjunto de relaciones siguiente: [6]

$$Y = \frac{5PL^3}{384EI} \quad (8)$$

$$P = QAL \quad (9)$$

$$M = \frac{PL}{8} \quad (10)$$

$$S = \frac{M}{Z} \quad (11)$$

$$b = \frac{P}{Y} \quad (12)$$

El significado de las variables anteriores es el mismo que se definió en el caso precedente. De manera similar al caso anterior, se combinan las relaciones (8) y (9) para expresar lo siguiente:

$$\frac{QL^4}{Y} = \frac{384EI}{5A} = K \quad (13)$$

donde:

K = coeficiente de rigidez para carga uniformemente distribuida.

Nuevamente el comportamiento experimental del metal expandido mostró que el coeficiente K se convierte en una función del claro L, la cual puede evaluarse mediante la siguiente relación:

$$K = \frac{bL^3}{A} \quad (14)$$

El valor de b se obtiene de los datos experimentales como la pendiente de la relación carga total-deflexión en cada lámina de ensayo. Cabe señalar que los valores de b se obtuvieron procesando los datos experimentales mediante un análisis computarizado de regresión lineal. Los resultados de este análisis se discutirán en la sección 5.

4.3 Momento flector de fluencia

Un total de cuatro láminas de cada estilo fueron sometidas a flexión bajo carga concentrada en línea a lo ancho hasta sobrepasar la condición de fluencia en la sección central. El momento flector

correspondiente a la condición de fluencia inminente se determinó mediante la ecuación que sigue:

$$MF = \frac{PFL}{4} \quad (15)$$

donde:

MF = momento flector de fluencia

L = claro

PF = carga correspondiente al inicio de la fluencia

El valor de PF se obtuvo directamente de la gráfica de carga-deflexión como el valor de la carga correspondiente al límite de proporcionalidad. Una explicación más detallada sobre el método, los datos y gráficas se encuentra en la referencia [5].

4.4 Momento flector admisible por unidad de ancho.

Para elaborar tablas de especificación de cargas seguras, es necesario definir los siguientes parámetros:

$$Mu = \frac{M}{A} \quad (16)$$

$$Muf = \frac{MF}{A} \quad (17)$$

$$Mua = \frac{Muf}{FS} \quad (18)$$

donde:

Mu = momento flector por unidad de ancho

M = momento flector neto

Muf = momento flector de fluencia por unidad de ancho

Mua = momento flector admisible por unidad de ancho

FS = factor de seguridad.

El uso de estas relaciones se verá en la sección siguiente.

5. DATOS EXPERIMENTALES Y ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 Determinación de cargas y momentos flectores de fluencia

Los valores de PF y MF se obtuvieron experimentalmente realizando ensayos de flexión hasta la fluencia con cuatro muestras de cada uno de los estilos de lámina estudiados. Los datos experimentales se presentan compendiados en forma de tablas y gráficos en la referencia [5].

La información más útil que se extrae de dichas tablas y gráficos se resume en las tablas 2 y 3 de esta sección.

5.2 Determinación de constantes elásticas y coeficientes de rigidez para flexión con carga concentrada.

Una muestra de 20 cm. de ancho nominal de cada estilo de lámina (muestra # 5) fue sometida a repetidas pruebas de flexión bajo carga concentrada, utilizando un claro diferente en cada prueba. Los datos de carga y -deflexión se correlacionaron mediante un programa de regresión lineal que calculaba automáticamente los parámetros r (factor de correlación), a (constante de intersección), y b (pendiente de la relación carga-deflexión). Los datos experimentales y su respectiva correlación correspondientes a estas pruebas se presentan completos en la referencia [5].

TABLA No. 2.
VALORES DE PF, MF Y Muf PARA CADA MUESTRA

ESTILO DE LAMINA	No. MUESTRA	ANCHO A cm.	CLARO L cm.	PF Kg.	MF Kg.cm	Muf Kg.
1	1	20.3	30	80	600	30
	2	20.3	30	100	750	37
	3	20.3	50	48	600	30
	4	20.2	50	46	575	29
2	1	20.2	30	52	390	19
	2	20.1	30	50	375	19
	3	20.2	50	30	375	19
	4	20.2	50	25	313	15
14	1	19.7	30	55	413	21
	2	20.0	30	56	420	21
	3	20.0	50	24	300	15
	4	19.8	50	30	375	19

TABLA No. 3
VALORES PROMEDIO DE Muf y Mua PARA CADA LAMINA

ESTILO LAMINA	Muf Kg	Mua* Kg
1	32	16
2	18	9
14	19	9.5

* Se utilizó un F.S. igual a 2.0

El parámetro b es la constante elástica o pendiente de la relación carga-deflexión para cada prueba específica realizada y su valor es esencial para poder calcular el coeficiente de rigidez K. El método de cálculo se basa en la ecuación (7) y en los datos de las tablas arriba mencionadas. Un resumen de los resultados obtenidos se ofrece en la tabla No. 4.

TABLA No. 4.
Constante elástica y coeficiente de rigidez para carga concentrada obtenidos con muestras de 20 cm. de ancho nominal. (muestras # 5).

ESTILO LAMINA	CLARO L cm.	CONSTANTE ELASTICA b Kg/cm.	COEFICIENTE DE RIGIDEZ K Kg.cm x 10 ⁵
1	21.7	444.44	2.271
	27.9	211.03	2.292
	40.3	71.50	2.340
	46.5	48.42	2.434
2	21.7	211.64	1.081
	27.9	108.75	1.181
	40.3	34.80	1.139
	46.5	20.15	1.013
14	21.7	183.11	0.936
	27.9	83.54	0.907
	40.3	27.29	0.893
	46.5	17.94	0.902

Al analizar la *tabla No.4* se descubre que el factor K no se mantiene constante con respecto al claro de la muestra, evidenciando así un comportamiento diferente al de una viga ideal.

El modelo matemático que se usará para evaluar la relación genérica carga-deflexión-claro, requiere de un valor de K lo más exacto posible al valor experimental. Conforme a esta necesidad, se graficaron los valores de K de la *tabla No.4* en función de los respectivos valores de L, obteniéndose las curvas experimentales mostradas en el gráfico de la *figura No. 4*. El uso de estas curvas se verá más adelante.

5.3 Determinación de constantes elásticas y coeficientes de rigidez para flexión bajo carga uniforme.

Las muestras 5 de cada estilo de lámina se volvieron a usar en un conjunto de pruebas de

flexión similar al descrito en la sección previa, con la diferencia de emplear carga uniformemente distribuida en lugar de carga concentrada.

Mediante un programa de regresión lineal se correlacionaron los datos de carga total contra los datos de deflexión para un mismo valor de claro. Se obtuvieron correlaciones altamente lineales cuya pendiente corresponde al valor experimental de la constante elástica b de cada muestra. Finalmente se empleó la ecuación (14) para calcular el coeficiente de rigidez K bajo carga uniforme, obteniéndose los resultados que se muestran en la *tabla No. 5*.

Los resultados de la *tabla No. 5* demuestran que nuevamente el valor del coeficiente K varía con la magnitud del claro L, es decir que la lámina de metal expandido no se comporta como viga ideal.

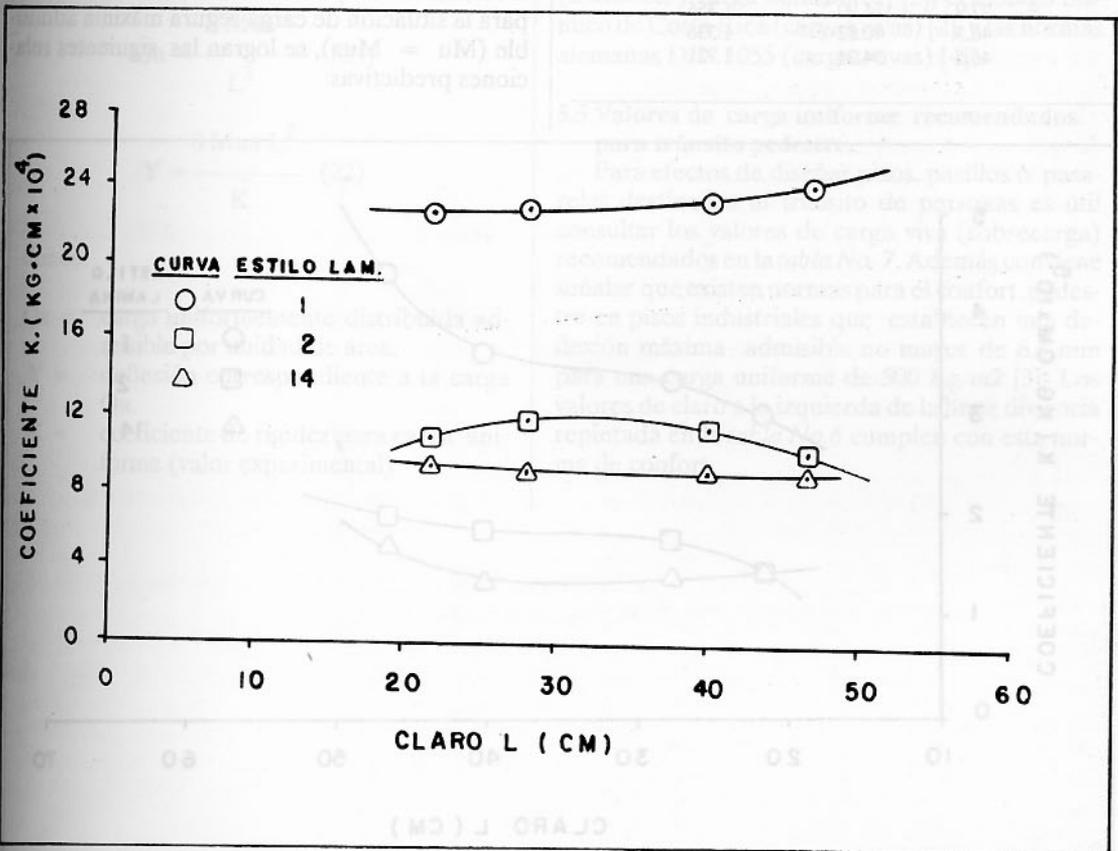


FIGURA No. 4. Gráfico del coeficiente K en función del claro L para carga concentrada.

TABLA No.5.

Constante elástica y coeficiente de rigidez para carga uniforme obtenido con muestras de 20 cm. de ancho nominal. (muestras # 5).

ESTILO LAMINA	CLARO L cm.	CONSTANTE ELASTICA b Kg/cm.	COEFICIENTE DE RIGIDEZ K Kg.cm x 10 ⁵
1	21.7	585.08	2.989
	27.9	307.33	3.337
	40.3	110.06	3.602
	46.5	87.42	4.395
2	21.7	280.22	1.432
	27.9	163.54	1.776
	40.3	56.04	1.834
	46.5	40.92	2.057
14	21.7	277.40	1.417
	27.9	124.90	1.356
	40.3	40.82	1.336
	46.5	34.24	1.721

Al graficar los valores de K en función de L de la *tabla No. 5* se obtiene el gráfico de la *figura No.5*, cuya utilidad se verá en la sección siguiente.

5.4 Elaboración de tabla de carga segura y deflexión en función del claro

En esta sección se cumplirá el tercer objetivo de este estudio, cual es el de confeccionar una tabla de especificación de carga segura (concentrada y uniforme) y deflexión en función del claro de diseño, para los tres estilos de lámina ensayados.

5.4.1 Modelo matemático.

Para predecir los valores de carga máxima segura (contra una falla de fluencia) y sus correspondientes deflexiones a un valor dado de claro, se elaboró un modelo matemático basado en las ecuaciones (3), (6), (10), (13), (16) y (18). Expresando cargas y deflexiones en función del claro mediante el conjunto de ecuaciones anteriores, para la situación de carga segura máxima admisible ($M_u = M_{ua}$), se logran las siguientes relaciones predictivas:

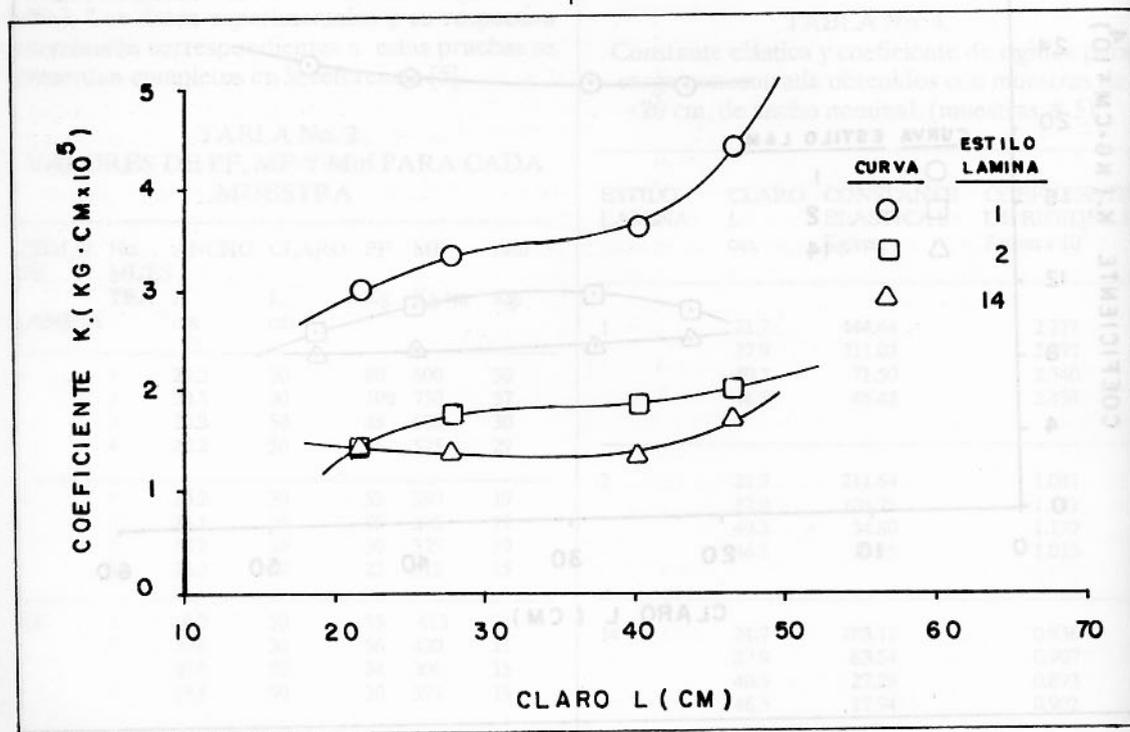


FIGURA No. 5. Gráfico del coeficiente K en función del claro L para carga uniformemente distribuida.

Carga concentrada en línea:

$$W_a = \frac{4M_{ua}}{L} \quad (19)$$

$$Y = \frac{4M_{ua} L^2}{K} \quad (20)$$

donde:

W_a = carga concentrada admisible por unidad de ancho.

Y = deflexión correspondiente a la carga W_a .

K = coeficiente de rigidez para carga concentrada (valor experimental).

Carga uniformemente distribuida:

$$Q_a = \frac{8 M_{ua}}{L^2} \quad (21)$$

$$Y = \frac{8 M_{ua} L^2}{K} \quad (22)$$

donde:

Q_a = carga uniformemente distribuida admisible por unidad de área.

Y = deflexión correspondiente a la carga Q_a .

K = coeficiente de rigidez para carga uniforme (valor experimental)

5.4.2 Generación de tabla de carga segura o admisible

Usando los valores de M_{ua} de la tabla 3 (F.S. = 2.0), los valores experimentales de K leídos en los gráficos de las figuras No. 4 y No. 5 y las ecuaciones (19), (20), (21) y (22), se elaboró un programa de cálculo que resolvió dichas ecuaciones para distintos valores del claro L . Los resultados obtenidos se presentan en la tabla No. 6, donde se muestran los valores de carga admisible y deflexión correspondientes a los datos provenientes de las muestras #5 de cada lámina.

En la tabla No. 6 se señala mediante una línea divisoria repintada las condiciones del claro máximo recomendado para el diseño de pisos, pasillos, pasarelas y similares con tránsito constante y aglomerado de personas ($Q = 500 \text{ kg/m}^2$), calculado con base en un factor de seguridad de 2:1 (basado en la resistencia de fluencia), las especificaciones federales norteamericanas RR-G-66lb (deflexión y carga admisibles) [3], el Código Sísmico de Costa Rica (cargas vivas) [2], y las normas alemanas DIN 1055 (cargas vivas) [4].

5.5 Valores de carga uniforme recomendados para tránsito pedestre.

Para efectos de diseñar pisos, pasillos o pasarelas destinados al tránsito de personas es útil consultar los valores de carga viva (sobrecarga) recomendados en la tabla No. 7. Además conviene señalar que existen normas para el confort pedestre en pisos industriales que establecen una deflexión máxima admisible no mayor de 6.4 mm para una carga uniforme de 500 Kg/m² [3]. Los valores de claro a la izquierda de la línea divisoria repintada en la tabla No.6 cumplen con esta norma de confort.

TABLA No. 6.
TABLA DE DISEÑO Y SELECCION: cargas admisibles y deflexiones en función del claro para flección elástica.

ESTILO DE LAMINA	TIPO DE CARGA	CLARO L (cm)								55	60	65	70
		20	25	30	35	40	45	50					
1-ACERO	W	320	256	213	183	160	142	128	116	107	98	91	
	Y	1.13	1.75	2.50	3.38	4.38	5.4	6.32	7.17				
	Q	3200	2048	1422	1045	800	632	512	423	356	303	260	
	Y	1.77	2.53	3.43	4.57	5.69	6.25	6.40	6.62				
2-ACERO	W	180	144	120	103	90	80	72	65	60	55	50	
	Y	1.37	1.97	2.70	3.64	5.05	6.94	9.57	13.12				
	Q	1800	1152	800	588	450	356	288	238	200	170	140	
	Y	2.22	2.73	3.54	4.77	6.23	7.36	8.00	8.71				
14 ACERO	W	188	150	125	107	94	84	75	68	63	58	54	
	Y	1.57	2.55	3.76	5.18	6.76	8.46	10.22	11.8				
	Q	1880	1203	836	614	470	371	301	249	209	178	150	
	Y	2.03	3.36	5.01	6.93	8.98	9.52	9.40	9.68				

W: Carga concentrada admisible por metro de ancho (Kg/m).

Q: Carga uniforme admisible por metro cuadrado de superficie (Kg/m²).

Y: Deflexión elástica (mm).

NOTAS:

a) Valores de carga admisible basados en un factor de seguridad de 2.0 con respecto a la resistencia de fluencia.

b) Los claros a la izquierda de la línea repintada deben usarse para el diseño de pasillos y pasarelas con tránsito constante de personas (Q = 500 kg/m²)

TABLA No. 7.
VALORES DE CARGA VIVA UNIFORME
PARA TRANSITO PEDESTRE.

TIPO DE TRANSITO	CARGA VIVA UNIFORME Kg/m ²
PEDESTRE	
Liviano u ocasional	165
Normal o frecuente	330
Constante y aglomerado	500
Constante con equipo liviano	660 a 1160

6. CONCLUSIONES

6.1. Se encontró una relación teórico - experimental para predecir el comportamiento elástico de tres estilos de láminas de metal expandido sometidas a cargas de flexión. Dicha relación tiene la siguiente forma:

$$\frac{PL^3}{Y} = K$$

La ecuación anterior correlaciona simultáneamente carga total, claro y deflexión en términos del coeficiente de rigidez K, el cual se determinó experimentalmente para cada estilo de lámina y para carga concentrada o uniforme. Se encontró que el factor K varía en función del claro L.

6.2 La teoría convencional de la flexión aplicada a una viga ideal, sujeta a una carga dada, predice que el factor K depende únicamente de la sección transversal de la viga y del módulo de elasticidad del material; por lo tanto el valor teórico de K es constante para una viga dada, independientemente del claro L. Sin embargo como resultado notable se determinó que las vigas de metal expandido no se comportaron experimentalmente como vigas teóricas convencionales, ya que su coeficiente de rigidez K manifestó cambios de valor importantes en función del claro L.

6.3 A pesar de que no se formuló un modelo analítico que explique el comportamiento elástico del metal expandido, se hicieron algunas conside-

raciones teóricas que pueden contribuir a explicar dicho comportamiento, tales como las siguientes:

– Las láminas de metal expandido sobrepuestas (estilos 1 y 2) actúan como vigas sometidas a flexión asimétrica o desviada: el eje de carga transversal no es paralelo a ninguno de los ejes principales de inercia de la sección transversal.

– Los hilos del metal expandido, por su forma zigzageante, se ven sometidos no solamente a carga axial debida a la flexión, sino también a carga cortante transversal y a carga cortante torsional. Se cree que la deformación torsional de los hilos influye significativamente en la variación del coeficiente K con el claro L. Esto es cierto también para las láminas aplanadas (estilo 14).

6.4 La respuesta elástica en términos de deflexión del metal expandido es muy sensible a los parámetros geométricos característicos de la lámina: DLR, DTR, PL, PT, AH, EH, y EL, dados en la figura No. 1. De estos parámetros depende la rigidez y la constante elástica con que la lámina responderá a las cargas externas. Atendiendo a esta consideración se concluye que la producción de metales expandidos debe someterse a estrictas normas de manufactura y control de calidad que garanticen la uniformidad de las dimensiones del producto dentro de tolerancias preestablecidas.

6.5 Las especificaciones de carga admisible y deflexión en función del claro de diseño (tabla No. 6) desarrolladas en este estudio tienen plena validez teórica y experimental sobre las muestras utilizadas en su elaboración. Dichas especificaciones constituyen información útil para diseño y selección de los productos de metal expandido disponibles en el mercado local, siempre y cuando estos mantengan las mismas propiedades geométricas (especificación de dimensiones) y las mismas propiedades de material (especificaciones de la materia prima) que las muestras usadas en este estudio. Las especificaciones de la tabla 6 no son aplicables a productos de metal expandido de otros estilos, materiales o geometrías.

6.6 Los resultados de la tabla No. 6 señalan que la lámina estilo 1 es la más resistente y apropiada para la construcción de pisos y estructuras similares, puesto que permite una estructura soporte (emparrillado) con apoyos cada 50 cm. En com-

paración, los estilos 12 y 14 requieren una estructura soporte con apoyos cada 35 cm, lo cual puede resultar antieconómico. En términos generales se considera conveniente producir láminas de mayores dimensiones (rombo más grande, mayor espesor de hilo) para disponer de un material de mayor resistencia y capacidad para usos estructurales que requieran claros superiores a los 50 cm.

BIBLIOGRAFIA

1. American Society for Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standards. 1986. Section 1: "Iron and steels products". Vols. 01, 03, 04. Printed in Easton, M.D., U.S.A.
2. "Código Sísmico de Costa Rica". 1986. Colegio Federado de Ingenieros y arquitectos. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
3. Mc. Nichols Company. 1989. "Product Catalog N° 84". Tampa, Florida, U.S.A.
4. Metalco. 1987. "Catálogo General de Productos". San José, Costa Rica.
5. Pacheco, A. 1990. Especificaciones de diseño para láminas de metal expandido bajo cargas de flexión. Informe técnico no publicado. San José, Costa Rica.
6. Popov, E.P. 1986. "Introducción a la mecánica de sólidos". Editorial Limusa, S. A. México.