

## EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN GEOMETRÍA-RIGIDEZ EN PIEZAS DE MATERIAL PLÁSTICO.

Ramón Flores Gómez<sup>1</sup>, Álvaro Ayala Ruiz<sup>2</sup>, Miguel Ángel Cruz.  
Centro de Diseño Mecánico, Facultad de Ingeniería, UNAM,  
Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, CP. 4510  
Tel.56228050 ext 124,  
<sup>1</sup>r\_k\_honer@hotmail.com, <sup>2</sup>maktub10@yahoo.com

### RESUMEN

Este trabajo valida las recomendaciones de diseño de costillas, como refuerzos, para el aumento de rigidez en piezas de plástico, apoyándose de manuales de diseño de empresas como DUPONT, GE, TICONA y DSM). El trabajo evalúa la variación de dos parámetros de diseño, utilizando dos tipos de material plástico PBT y proponiendo cuatro configuraciones en la geometría.

Aunque el uso de costillas da a los diseñadores una gran oportunidad de obtener una eficiente respuesta estructural en piezas de plástico, el uso de refuerzos de costillas puede resultar en problemas de apariencia y alabeo en la pieza durante el proceso de inyección. En dichos problemas de inyección, interviene el mal uso de variables, por ejemplo, presión, temperatura, tiempo y velocidad de inyección. El conocimiento del diseño de refuerzos para piezas de plástico es limitado, debido a que existen dudas de cómo usarlos, además de que los manuales desarrollados, se basan en la experiencia de los diseñadores.

El resultado obtenido en el presente trabajo proporciona información para el diseño de costillas como refuerzos en piezas de plástico que le ayudará a los diseñadores, durante el proceso de diseño de la pieza, encontrar el óptimo desempeño de geometría-rigidez.

### INTRODUCCIÓN

Los materiales plásticos tienen características propias que los hacen distintos de otros materiales, es por ello que los conceptos generales a tener en cuenta cuando se diseñan o definen piezas con materiales plásticos difieren en buena parte de los metales.

En general se pueden trazar líneas básicas que se deben respetar: evitar los espesores excesivos en la pieza, mayores espesores provocan un enfriamiento irregular de la pieza y provocan la formación de rechupes o se generan tensiones, además de que provocan un mayor costo, puesto que se está utilizando más cantidad de materia prima de la necesaria; los espesores en la pieza deben ser uniformes para evitar las tensiones internas de la pieza, provocadas por la diferencia en el tiempo de enfriamiento, la búsqueda de simetría de la pieza es una buena práctica, ya que se gana en estabilidad dimensional, se evitan deformaciones y por ende, disminución de costos; las aristas y ángulos vivos, debilitan la pieza, ya que son un fácil punto de rotura y pueden ocasionar tensiones.

Es frecuente que las piezas moldeadas no cumplan con las especificaciones pre-establecidas de diseño. En estos casos, se tienen que aplicar correcciones para mejorar la productividad y calidad de las piezas de plástico fabricadas por inyección mediante los puntos de análisis siguientes: el molde, el medio ambiente, la máquina de inyección, mano de obra y las variables de proceso presión, tiempo, temperatura y velocidades.

La tabla 1 muestra una gran variedad de problemas debido a los parámetros de inyección, diseño y manufactura, estos ya se han estudiado ampliamente, sin embargo, existen otras causas que provocan un mal funcionamiento en las piezas de plástico. Estas aparecen normalmente cuando se presenta una sustitución de material (metal por plástico), un cambio en el material de inyección, o cambio en el uso de la pieza. Lo anterior ocasiona que las piezas se encuentren sometidas a cargas combinadas para las cuales no se diseñaron.

**Tabla 1 Causas de problemas en piezas de moldeo referidas a una variable [15].**

Causa de problema	Variables que influyen (principalmente)
<ul style="list-style-type: none"> <li>*Excesivo empaquetamiento (dificultad de extracción de la pieza) (+).</li> <li>*Llenado lento del molde (+).</li> <li>*Mala distribución en el premezclado (+ contrapresión).</li> <li>*Plástico del molde insuficiente para impedir una contracción producida por bordes (+).</li> <li>*Presión elevada (rebaba) (-).</li> <li>*Maquina no adecuada para la presión necesaria de la pieza.</li> <li>*Baja presión de inyección (+).</li> <li>*Insuficiente carga del material (+).</li> <li>*Plástico demasiado frío (+).</li> <li>*Choque de dos o más frentes de flujo (+).</li> <li>*El material no llena el molde en el tiempo establecido (+).</li> <li>*Disminuye el volumen a medida que se enfría y cristaliza el plástico, para encogimiento excesivo (+) y contracción insuficiente (-).</li> <li>*La contracción térmica del plástico no puede ser compensada en ciertas zonas (+).</li> </ul>	Presión
<ul style="list-style-type: none"> <li>*Entrada o boquilla estrecha (-).</li> <li>*Inyección lenta (+).</li> <li>*Alta velocidad de enfriamiento (+).</li> <li>*La contracción térmica del plástico no puede ser compensada en ciertas zonas (-).</li> </ul>	Velocidad de inyección
<ul style="list-style-type: none"> <li>*Temperaturas de procesamiento inadecuadas ocasionando deformación (+).</li> <li>*Por no enfriar completamente la pieza antes de liberarla del molde (encogimiento excesivo (+) y encogimiento insuficiente (-) [XX].</li> </ul>	Tiempo de enfriamiento
<ul style="list-style-type: none"> <li>*Temperatura inadecuada de trabajo (pandeo después de enfriamiento) (+).</li> <li>*Temperatura desigual (burbujas internas) (-).</li> <li>*Enfriamiento prematuro en una sección (+).</li> <li>*La contracción térmica del plástico no puede ser compensada en ciertas zonas (+).</li> <li>*Piezas demasiado frías.</li> <li>*La resina entra fría al molde.</li> <li>*Llenado muy lento del molde.</li> <li>*Canales de enfriamiento del molde obstruidos.</li> <li>*Molde frío (rupturas, grietas o líneas de flujo).</li> <li>*Material sobrecalentado (+).</li> <li>*No enfriar completamente la pieza antes de sacarla del molde.</li> <li>*Excesiva contracción debido a la baja temperatura del molde.</li> <li>*Insuficiente contracción debido a la alta temperatura del molde.</li> </ul>	Temperatura del molde durante el proceso

<ul style="list-style-type: none"> <li>*El material entra frío en el molde.</li> <li>*Llenado lento del molde.</li> <li>*Material sobrecalentado.</li> <li>*Temperaturas de procesamiento inadecuadas (+).</li> </ul>	<p>Temperatura del material de inyección</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>*Resina entra fría al molde.</li> <li>*Llenado del molde muy lento.</li> </ul>	<p>Temperatura de la boquilla.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>*Molde defectuoso (mecánico).</li> <li>*Colorante inadecuado (material).</li> <li>*Plástico del molde insuficiente para impedir una contracción producida por bordes (diseño y material).</li> <li>*Secado inadecuado del material antes de su procesamiento (mecánico).</li> <li>*Excesiva alimentación del material (mecánica).</li> <li>*Máquina inadecuada según la presión necesaria de la pieza a inyectar (diseño).</li> <li>*Canales de inyección obstruidos (técnicos).</li> <li>*Diseño deficiente del molde (diseño).</li> <li>*Sistema de refrigeración en malas condiciones (técnicos).</li> <li>*Variación de espesor de las piezas (diseño).</li> <li>*Ductos de máquina de inyección sucios (técnicos).</li> </ul>	<p>Otros</p>

En el diseño de las piezas de plástico se busca la integridad estructural sin crear paredes de gran espesor, para lograr lo anterior es necesario aumentar la rigidez de la pieza o el valor del momento de inercia. Esto es especialmente verdad en piezas sujetas a cargas por flexión. Los elementos usados para esto son las costillas. Existen otros métodos aceptables para mejoramiento de propiedades en secciones de plástico, como los *Bosses* (que además sirven como alojamiento y sujeción para elementos de fijación [1]), y que se utilizan en conjunto con las costillas cuando se esperan fuerzas laterales, así mismo, existe la opción de los cartabones (*Gussets*).

### OBJETIVO

Aunque el uso de costillas da a los diseñadores una gran oportunidad de obtener una eficiente respuesta estructural en piezas de plástico, el uso de las costillas puede resultar en problemas de apariencia y alabeo en la pieza. En general la experiencia de los diseñadores es no usar costillas, si existen dudas en cuanto a la necesidad de usarlas. Por lo que existen una gran cantidad de recomendaciones, guías y reglas de diseño [6, 2, 3, 10, 9, 1].

Uno de los cambios en la industria del plástico es cambiar del concepto de diseño basado en reglas al diseño basado en análisis [1].

La relación esfuerzo-deformación de los plásticos es no lineal, sin embargo para diversos diseños una aproximación lineal es aceptable. Así también los esfuerzos y deformaciones calculados tienen diferente significado en los materiales plásticos. Para los componentes metálicos las fallas normalmente están expresadas en términos de esfuerzos dado que la relación con la deformación es lineal, pero para los plásticos esto no es verdad, debido a su comportamiento no lineal. En otras palabras los criterios de diseño (esfuerzo y deformación) tienen que ser expresados de manera independiente uno de otro [12].

El presente trabajo tiene como objetivo validar las recomendaciones de diseño de costillas realizadas por empresas fabricantes de materiales y las mostradas en la literatura basadas en la deformación de las piezas.

### VALIDACIÓN DEL SOFTWARE

Para validar y verificar la convergencia de los resultados en el sistema a utilizar en este trabajo UG-NX5, se realizó una comparación de resultados, entre los valores teóricos, los valores proporcionados por el software Nisa-Display [11] y los valores obtenidos en UG-NX5. En la Tabla 1 se muestran los resultados del análisis de viga en cantilever, sujeta a una fuerza puntual de 1000 [N]. Las dimensiones de la viga fueron de 1000 x 30 x 30 [mm], considerando un material con  $E=207$  GPa y un coeficiente de Poisson de 0.3.

**Tabla 1 Relación de resultados y porcentajes de error.**

	<i>Esfuerzo [N/mm<sup>2</sup>]</i>	<i>% Error</i>	<i>Deflexión [mm]</i>	<i>% Error</i>
Teóricos	222.22		23.85638	
NISA	222.22	0.00099	23.8564	0.00005
UG-NX5	223.698	0.66	23.823	0.13992

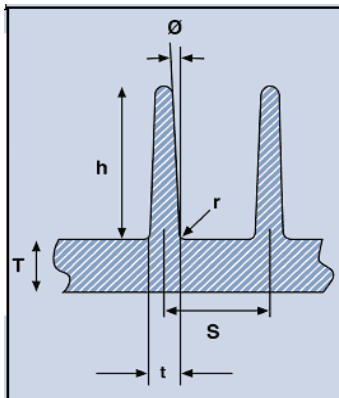
Es necesario comentar que los resultados proporcionado por Nisa-Display es utilizando un elemento unifilar mientras que en UG-NX5 se utilizó un elemento tetraedro de 10 nodos.

Los resultados muestran que los valores obtenidos en UG-NX5 tiene un error mayor que los resultados de Nisa-Display, sin embargo, se considera que los resultados convergen y no están alejados del valor teórico, por lo que en este trabajo se consideró que los resultados del sistema UG-NX5 son confiables.

### RECOPIACIÓN DE DATOS

#### Recomendaciones de diseño para costillas.

En la tabla 2 se muestran los parámetros de costillas, donde empresas, como DUPONT [6], TICONA [2, 3], GE [10], DSM [9] y otros, proporcionan sus propios datos de acuerdo a su experiencia en el campo de estudio. Los parámetros que se consideran de acuerdo a la geometría de la costilla son los siguientes (Fig. 1):



**Fig. 1 Parámetros de costillas [9].**

Donde:

- T: Espesor de la pared.
- $\theta$ : Ángulos situados en la parte más alta de la costilla.
- h: Altura.
- t: Espesor de costillas.
- r: Radio de filete en la base de la costilla.
- S: Distancia entre costillas.

**Tabla 2 Parámetros de costilla.**

Parámetro  Empresa	Ángulo “ $\theta$ ” [°]	Altura “h” [número de veces el espesor de la pared]	Espesor de costillas “t” [% del espesor de pared nominal]	Radio del filete en la base de la costilla “r” [% de espesor de la pared nominal]	Distancia entre costillas “S” [número de veces el espesor de la pared]
TICONA	1.5 – 3 *	1.5 – 5	50	No especificado	Mínimo 2
GE	1.5-3 *	Máximo 3	50 - 60	25-50	Mínimo 2
DUPONT [6]	**	Máximo 3	50 ***	50	No especificado
DSM	*	Máximo 3	50	25-50	Mínimo 2
EFUNDA [12]	No especificado	Máximo 3	40 - 60	Mínimo 25	Mínimo 2

Notas:

\*Ángulo mínimo de 0.5° para el caso del material PBT y PET [16].

\*\*Se puede considerar los siguientes ángulos para las siguientes aplicaciones:

1. Diseño por apariencia:  $\frac{1}{4}$  -  $\frac{1}{2}$  °
2. Diseño para estructura:  $\frac{1}{4}$  -  $\frac{1}{2}$  °
3. Diseño para moldeo de espuma: 1°

\*\*\*Se puede considerar los siguientes espesores de costillas en relación al espesor de la pared para las siguientes aplicaciones:

1. Diseño por apariencia 40%
2. Diseño para estructura: 60%
3. Diseño para moldeo de espuma: 100%

Aunado a las anteriores recomendaciones existen guías de diseño referentes a las posibles geometrías a utilizar, tal es el caso de TICONA [7] que muestra 8 posibles recomendaciones y Malloy [5] que muestra 4 configuraciones.

### DESARROLLO DEL MODELO

Para determinar los efectos de cada uno de los parámetros de la tabla 2 con las geometrías propuestas, se analizó una viga empotrada de dimensiones 120 x 20.8 x 10 [mm]. Es necesario mencionar que para este estudio se consideraron los siguientes parámetros para costillas: ángulo de salida ( $\theta$ ), espesor de la costilla (t), donde la combinación de estos, definen un perfil.

Las razones por lo que se variaron sólo tres parámetros de costillas, son las siguientes:

Los parámetros están en función del espesor de la pared (T) y a las restricciones geométricas que se consideraron. La altura de la costilla es preestablecida, ya que se consideró una altura total de la viga en el que se tuviera la mínima altura de costilla, como lo propone TICONA [2,3] con altura de 1.5 T. Además, partiendo de la premisa de que, entre más altas sean las costillas, pueden existir problemas como: difícil llenado, se puede quedar la pieza en el molde de inyección y/o se pueden generar acumulaciones de masa de material en la base de la costilla [10].

Debido a las restricciones geométricas del ancho de la viga, el número de costillas longitudinales se limitó a tres.

En el caso de la distancia (S) entre una costilla a otra, la gran mayoría de las recomendaciones de las empresas no tenían variantes en dicho parámetro, es por eso que se decidió dejarlo constante.

Los parámetros que variaron son los siguientes: ángulo de salida de 0.5°, 1.5° y 3°; espesor de costilla (t) de 40%, 50% y 60% del espesor de “T”.

Los parámetros que permanecen constantes son: la pared principal (T), con un espesor de 4 [mm]; la altura de la costillas se restringe a 1.5 veces el espesor de “T” (h=6 [mm]); el radio (r) de intersección entre la costilla y la pared

principal será 25% del espesor de la pared “T” ( $r=1$  [mm]) y finalmente la distancia que debe existir entre dos costillas (S), considerada dos veces el espesor de “T” ( $S=8$  [mm]).

### Configuraciones

La configuración es la distribución de las costillas en una viga. Las configuraciones que se tomaron fueron cuatro, las más rígidas según TICONA [7]. En la figura 1, se presentan las configuraciones propuestas, analizadas como una viga en cantilever con las siguientes dimensiones:  $120 \times 20.8 \times 10$  [mm], a continuación se describe cada una de las configuraciones de estudio:

- Configuración con costillas unidireccionales.

El ancho de la sección transversal de la pared fue dividida en secciones equivalentes de acuerdo, a los parámetros preestablecidos, es decir, la distancia entre dos costillas fue de dos veces el espesor de “T” ( $S=2T$ ).

- Configuración con costillas cruzadas.

Las costillas perpendiculares a la sección transversal de la pieza, tienen una distancia entre si, de dos veces el espesor de la pared ( $S=2T$ ) y las costillas perpendiculares al eje longitudinal, la distancia considerada fue el doble de lo preestablecido ( $S=4T$ ).

Las costillas cruzadas se utilizan para reemplazar una sección constante de pared de la pieza, por otra estructura con la misma rigidez y con pérdida de peso, teniendo en cuenta que este tipo de costillas a  $90^\circ$  a lo largo de los ejes, no son eficaces para efectos de torsión (Fig. 1.B) [6].

- Configuración con costillas en V:

En esta configuración las costillas tienen un ángulo de  $45.3^\circ$  respecto al eje longitudinal. (Fig. 1.C).

- Configuración con costillas en X.

En esta configuración las costillas tienen un ángulo de  $46.5^\circ$  respecto al eje longitudinal (Fig. 1. D).

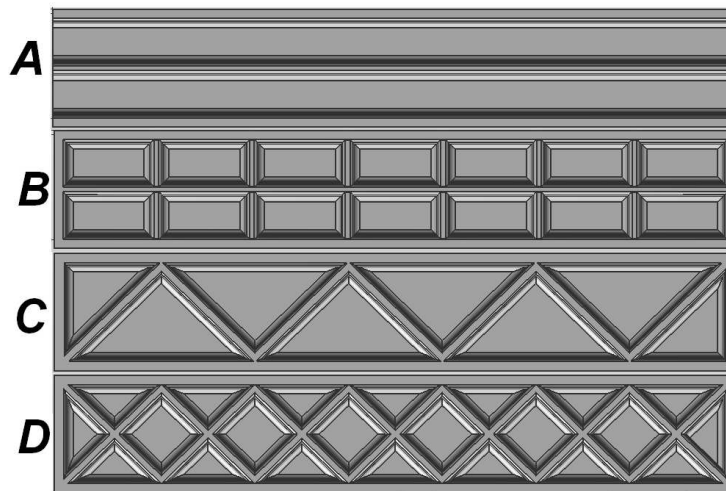


Fig. 2 Configuraciones a evaluar [6].

### Código

Para este trabajo se utilizó UG-NX5 como herramienta CAD, para la obtención de un de modelos CAD, modelando 36 perfiles, donde a la combinación de perfiles y configuraciones se le asignó un código formado por tres caracteres, con características específicas en cada perfil, es decir, una configuración, un espesor de costilla y un ángulo de salida. El primer carácter del código corresponde a la configuración (conformado por la letra A, B, C ó D), el segundo carácter es el ángulo de salida, para ángulo de  $0.5^\circ$  se le asignó el número 1, para ángulo de  $1.5^\circ$  se le asignó el número 2 y para ángulo de  $3^\circ$  se le asignó el número 3, y el tercer carácter es el espesor de la costilla, para el espesor de  $0.4 T$  se le asignó el número 1, para  $0.5 T$  se le asignó el número 2 y para  $0.6 T$  el número 3.

**Tabla 2 Definición de perfil.**

	1 <sup>er</sup> dígito				Θ		t	
	A	B	C	D	2° dígito	Valor	3 <sup>er</sup> dígito	Valor
PERFILES	1	10	19	28	1	0.5°	1	0.4T
	2	11	20	29			2	0.5T
	3	12	21	30			3	0.6T
	4	13	22	31	2	1.5°	1	0.4T
	5	14	23	32			2	0.5T
	6	15	24	33			3	0.6T
	7	16	25	34	3	3°	1	0.4T
	8	17	26	35			2	0.5T
	9	18	27	36			3	0.6T

**Material**

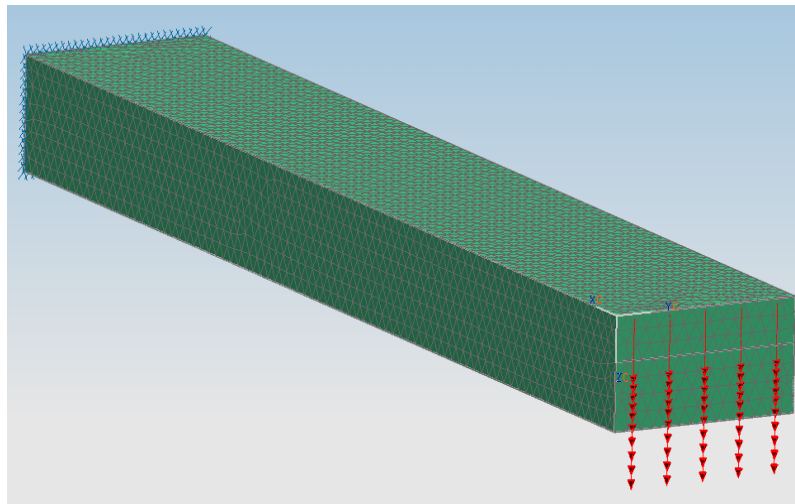
Los materiales que se utilizaron fueron plástico PBT reforzado con 30% de fibra de vidrio (PBT 2360FL (30% GF)) y PBT natural (PBT 1400A Celanex). Las propiedades de cada material se presentan en la siguiente tabla (Tabla 3).

**Tabla 3 Propiedades de materiales**

Propiedad	Material1 PBT (2360FL-30%GF-)	Material 2 PBT (1400 <sup>a</sup> Celanex)
E [MPa]	7600	2900
Poisson	0.423	0.38
ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	1518.9	1258.6

**Análisis**

Se realizó un análisis de los 36 perfiles en cantilever en la zona elástica de los materiales propuestos (Fig.3).



**Fig. 3 Mallado en UG-NX5.**

Para dicho análisis se tomaron en cuenta algunos puntos que a continuación se describen:

- a) La fuerza puntual de 50[N] fue aplicada en el extremo.
- b) En todos los perfiles, se utilizó un mallado compuesto de elementos tetraedros (10 nodos) y tamaño de malla de 1.5.
- c) En el análisis se tomaron tres nodos (a, b y c), con la finalidad de registrar los desplazamientos. El punto que registró los mayores desplazamientos fue el punto “c”, por lo que fue el punto de comparación entre los diversos perfiles (Fig. 4).

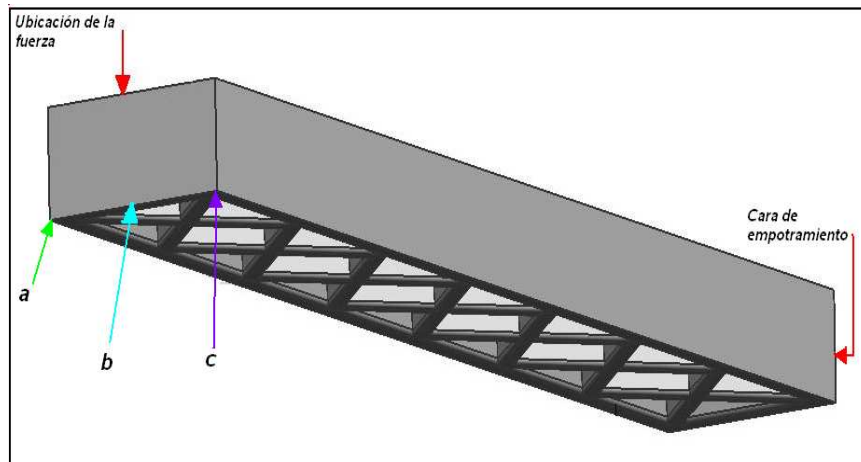


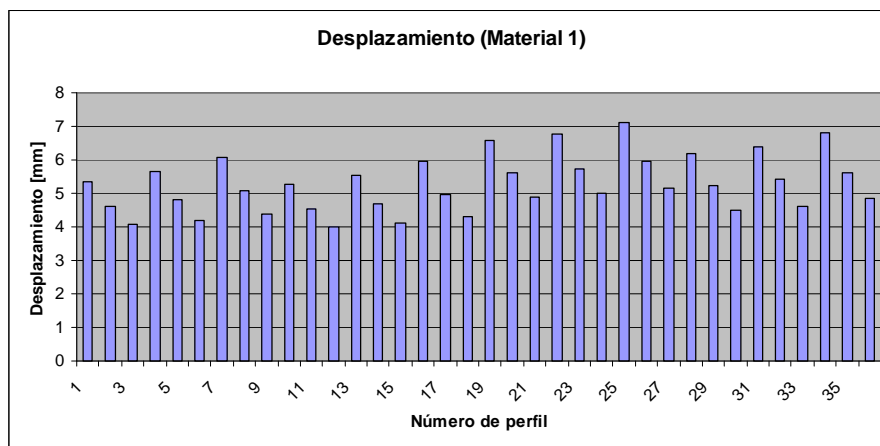
Fig. 4 Ubicación de nodos de estudio.

### RESULTADOS

Las piezas con costillas de 0.4T de espesor tienen mayor desplazamiento y las que sufren menor desplazamiento son las que tienen un espesor de 0.6T y los perfiles son el 12, 3, 15, 6 y 18 (Gráfica 1 y 2).

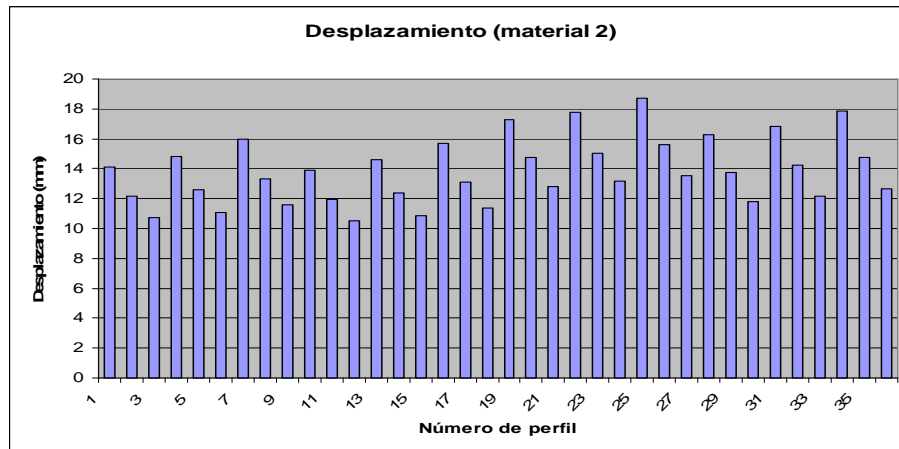
Las piezas que presentaron mayor desplazamiento, fueron las piezas con costillas de espesor de 0.4T y ángulos de salida de 3°, los perfiles con estas características son el 25, 34, 22, 19 y 31 (Gráfica 1 y 2).

El porcentaje en que aumenta la rigidez en todos los perfiles, con respecto al espesor de la costilla es el mismo para los dos materiales estudiados, las costillas que tienen espesor de 0.5T respecto a la 0.4T varían desde 13.6 a 17%, y las que tienen 0.6T respecto a la 0.4T varía desde 23.6 a 29%.



Gráfica 1 Comportamiento de los perfiles con PBT (2360FL-30%GF-)





Gráfica 2 Comportamiento de los perfiles con PBT (1400ª Celanex).

### CONCLUSIONES

Respecto al ángulo de salida ( $\theta$ ), es preferible utilizar un ángulo pequeño, ya que la pieza presentará un mayor momento de inercia. En el caso de las piezas con ángulo de salida mayor, presentaron menor rigidez y definitivamente ángulos de  $3^\circ$  no son recomendables, ya que se adelgaza el espesor de la costilla y pierde rigidez.

El espesor de la costilla es definitivamente el parámetro al que se le debe tomar mayor atención, los manuales de diseño mostraron en su mayoría espesores de 40 a 60% el espesor de la pared a reforzar, esto puede ser aplicable, pero para diferentes aplicaciones, es decir, definitivamente un espesor de 40% no sirve en una aplicación para estructura. En diseño de estructura es recomendable espesores de 60% ya que se registro un menor desplazamiento, incluso independientemente de la configuración que se le asigne a la pieza.

Para lograr una mayor integridad estructural, las configuraciones más eficientes son la “B” y la “A” y respecto a los materiales utilizados, presento el mismo patrón de deformación en todos los perfiles de estudio, por lo tanto se concluye que la rigidez (en el caso de los plásticos) no es un factor de gran influencia, la mayor aportación a la rigidez esta dada por la configuración, el ángulo de salida y el espesor de la pieza.

La configuración con mejor desempeño son las que no tienen ángulo de salida o menor a  $0.5^\circ$ , sin embargo, desde el punto de vista de manufactura de los moldes de inyección esto no es posible, ya que es necesario que la pieza cuente con el mayor ángulo de salida posible, lo anterior permite concluir que las guías de diseño para costillas encontradas en la literatura están basadas principalmente en consideraciones de manufactura, razón por la cual los diseñadores tratan de no utilizar costillas.

### REFERENCIAS

- [1] Krishnamachari S.I. “Applied stress analysis of plastics”. Editorial Van Nostrand Reinhold. Nueva York 1993.
- [2] Savgorodny V. K. “Transformación de plásticos”. Editorial Gustavo Gili, S. A. Barcelona, 1978.
- [3] Mink, Walter. “El plástico en la industria, tratado práctico de inyección de plásticos 1”. Editorial Gustavo Gili, S.A. de C.V. México, 1990.
- [4] Gordon M., Joseph Jr. “Total quality process control for injection molding”. 1ª Edición. Editorial Carl Hanser Verlag. Munich, Alemania, 1993.
- [5] Robert A. Malloy. “Plastic part design for injection molding”. Editorial HANSER. Nueva York 1994
- [6] Manual de Diseño de DUPONT. DuPont Engineering Polymers. General Design Principles for DuPont Engineering Polymers

- [7] Manual de Diseño de TICONA. "Engineering Plastics". C.3.4 Guidelines for the design of moldings in engineering plastics.
- [8] Manual de Diseño de TICONA: "Designing With Plastic".
- [9] DSM: [http://www.dsm.com/en\\_US/html/home/dsm\\_home.cgi](http://www.dsm.com/en_US/html/home/dsm_home.cgi)
- [10] GE Plastic: "Injection Molding Design Guidelines".
- [11] NISA II. "Verification problems manual". Editorial: Engineering mechanics research corporation. Michigan U.S.A.1990
- [12] [http://www.efunda.com/designstandards/plastic\\_design/plastic\\_intro.cfm](http://www.efunda.com/designstandards/plastic_design/plastic_intro.cfm)
- [13] L. Robert Weckman. Diagonal Ribs Increase torsional rigidity. Revista (Engineering Design". 1988
- [14] [http://www.scudc.scu.edu/cmdoc/dg\\_doc/develop/design/part/33000003.htm](http://www.scudc.scu.edu/cmdoc/dg_doc/develop/design/part/33000003.htm)
- [15] <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/Articulo.asp?A=6300>
- [16] [http://plastics.dupont.com/myplastics/Mediator?id=517&locale=en\\_US](http://plastics.dupont.com/myplastics/Mediator?id=517&locale=en_US)