

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

**Facultad de Ingeniería**

**Departamento de Ingeniería Química**



**Determinación del impacto del fenómeno de torsión generado por el uso de pigmentos sobre las dimensiones de piezas de polietileno de alta densidad, cuando son moldeadas por inyección**

**Víctor Hugo Echeverría Flores**

**Guatemala, 2005**



**Determinación del impacto del fenómeno de torsión generado por el uso de pigmentos sobre las dimensiones de piezas de polietileno de alta densidad, cuando son moldeadas por inyección**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

**Facultad de Ingeniería**

**Departamento de Ingeniería Química**

**Determinación del impacto del fenómeno de torsión generado  
por el uso de pigmentos sobre las dimensiones de piezas de  
polietileno de alta densidad, cuando son moldeadas por inyección**

**Víctor Hugo Echeverría Flores**

**Trabajo de graduación presentado para optar al grado  
académico de Licenciado en Ingeniería Química**

**Guatemala, 2005**

Vo.Bo.:

(f) \_\_\_\_\_

Ing. Gerardo José Overall

Tribunal:

(f) \_\_\_\_\_

Ing. Gerardo José Overall

(f) \_\_\_\_\_

Ing. Jaime Rosales Solórzano

(f) \_\_\_\_\_

Ing. José Eduardo Calderón

Fecha de aprobación: 07 de diciembre de 2005

## PREFACIO

### Agradezco a:

1. Dios, por darme la oportunidad de culminar mi carrera y porque, a pesar de las adversidades, Él siempre estuvo conmigo.
2. Mis padres y hermanos, por apoyarme siempre en mi carrera y darme aliento en los momentos en los que no tuve fuerzas para continuar.
3. PLASTICOLOR, S.A., por darme todo el apoyo necesario en la elaboración del proyecto.
4. GUATEPLAST, S.A., por ayudarme en tan corto tiempo en el diseño del molde y permitirme realizar el experimento en su planta.
5. Gerardo Overall, por asesorarme de la mejor manera posible en el desarrollo de la investigación.

### Dedico este trabajo a:

1. Dios, porque sin Él nada es posible.
2. Mis padres, con todo mi corazón, por enseñarme el camino correcto, inculcarme valores y brindarme la oportunidad de prepararme profesionalmente.
3. Mis Hermanos, por estar siempre a mi lado.

## RESUMEN

Este trabajo trata el fenómeno de torsión generado por el uso de algunos pigmentos sobre polietileno de alta densidad cuando es moldeado por inyección. Este fenómeno sucede por efectos de nucleación sobre la matriz del polímero, acelerando así el proceso de solidificación, de forma no homogénea, por lo cual se presentan encogimientos en las dimensiones de las piezas inyectadas, generando una deformación.

Para evaluar el problema se trabajó con ocho pigmentos (cuatro inorgánicos y cuatro orgánicos), a diferentes concentraciones. Se experimentó con una placa de 10 cm X 10 cm, con espesor de 2mm. Se evaluaron cuatro concentraciones típicas de aplicación de pigmentos en polvo, dadas en porcentaje de masa. Luego se realizaron las mediciones de encogimiento de la pieza y así se determinó el nivel de torsión. Los resultados obtenidos demuestran que todos los pigmentos evaluados, bajo condiciones estipuladas, generan un grado mínimo de torsión, clasificados todos en el nivel 1. Se demostró que el grado de torsión generado por pigmentos inorgánicos es despreciable puesto que en su mayoría se asemeja al encogimiento generado por el plástico virgen.

Así también, se obtuvo que los pigmentos orgánicos tienen mayor influencia en la deformación y que dicho nivel de torsión es creciente en relación a la concentración de aplicación del mismo. Por último, se observó que los pigmentos base ftalocianina son los que mayor problema causan; aunque no se puede encontrar un patrón químico para la clasificación. Sin embargo, se notó que el problema radica más en variables de proceso que en la influencia que generan los pigmentos.

## ABSTRACT

This project studies the warpage and distortion phenomena that might be influenced by the usage of some pigments in High Density Polyethylene when is injection-moulded. Distortion is caused by the nucleating effect over the plastic matrix on HDPE, accelerating the cooling process, on a non homogeneous way; therefore the shrinkage on the dimensions of the pieces generates warpage.

The project evaluates eight pigments (four inorganic and four organic pigments), at different concentrations. The experiment was made on a 10 cm X 10 cm chip, with a 2mm thickness. The experiment evaluates four typical concentrations of the pure pigments, as weight by weight percentages on the plastic. Results shows that all the pigments evaluated, under stipulated work conditions, where classified as level 1 on distortion problems; it means that the pigments generate some warpage but might be used on HDPE because warpage is negligible. Results also show that inorganic pigments has no significant influence on HDPE warpage.

On the other hand, organic pigments show more influence on distortion phenomenon, and the warpage level increase according to the concentration of the pigment in the plastic. The research also shows also that phtalocyanine pigments generates more warpage, but it is not possible to identify a chemical pattern to classify the pigments according to warpage generation. The results show that warpage is more influenced by some variables of the process, such as injection cycle, than the pigments.

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
PREFACIO	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE CUADROS	viii
LISTA DE GRÁFICOS	ix
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	3
a. Etimología e historia de los plásticos	3
b. Características generales de los plásticos	4
c. Polietilenos	5
d. Proceso de moldeo por inyección	6
e. Fenómeno de torsión en HDPE	6
f. Pigmentos	7
g. Métodos de evaluación de torsión	10
III. JUSTIFICACIÓN	11
IV. OBJETIVOS	12
V. PROBLEMA A RESOLVER	13
VI. METODOLOGÍA	14
VII. RESULTADOS	16
VIII. DISCUSIÓN	22
IX. CONCLUSIONES	24
X. RECOMENDACIONES	25
XI. BIBLIOGRAFÍA	26
XII. APÉNDICE	27

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro</b>	<b>Página</b>
1. Descripción de pigmentos a utilizar en experimento	13
2. Niveles de encogimiento y grados de torsión generados por los pigmentos analizados sobre una pieza inyectada de HDPE	16
3. Pigmentos utilizados para la experimentación	27
4. Especificaciones estándar para análisis realizado	27
5. Mezclas reales realizadas para cada análisis	28
6. Largo experimental medido sobre la pieza inyectada de HDPE ( $\text{cm} \pm 0.005$ )	29
7. Ancho experimental medido sobre la pieza inyectada de HDPE ( $\text{cm} \pm 0.005$ )	29
8. Datos intermedios calculados	31
9. Incertidumbres calculadas para cada cálculo realizado	32

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico</b>	<b>Página</b>
1. Cambios generados por el uso de pigmentos sobre las dimensiones de una pieza inyectada de polietileno de alta densidad (HDPE)	17
2. Clasificación del nivel de torsión generado por el uso de pigmentos inorgánicos sobre las dimensiones de una pieza inyectada de HDPE	18
3. Clasificación del nivel de torsión generado por el uso de pigmentos orgánicos sobre las dimensiones de una pieza inyectada de HDPE	19
4. Comparación entre la concentración de aplicación de pigmentos inorgánicos y el nivel de torsión generado por los mismos sobre una pieza inyectada de HDPE	20
5. Comparación entre la concentración de aplicación de pigmentos orgánicos y el nivel de torsión generado por los mismos sobre una pieza inyectada de HDPE	21
6. Cambios generados por el uso de pigmentos inorgánicos, a diferentes concentraciones, sobre las dimensiones de una pieza inyectada de HDPE	33
7. Cambios generados por el uso de pigmentos orgánicos, a diferentes concentraciones, sobre las dimensiones de una pieza inyectada de HDPE	34
8. Cambios generados por el uso de pigmentos, aplicados al 0.05 %, sobre las dimensiones de una pieza inyectada de polietileno de alta densidad (HDPE)	35
9. Cambios generados por el uso de pigmentos, aplicados al 0.10 %, sobre las dimensiones de una pieza inyectada de polietileno de alta densidad (HDPE)	36
10. Cambios generados por el uso de pigmentos, aplicados al 0.20 %, sobre las dimensiones de una pieza inyectada de polietileno de alta densidad (HDPE)	37
11. Cambios generados por el uso de pigmentos, aplicados al 0.30 %, sobre las dimensiones de una pieza inyectada de polietileno de alta densidad (HDPE)	38
12. Clasificación del nivel de torsión generado por el uso de pigmentos sobre las dimensiones de una pieza inyectada de HDPE	39
13. Comparación entre la concentración de aplicación de pigmento y el nivel de torsión generado por los mismos sobre una pieza inyectada de HDPE	40

# I. INTRODUCCIÓN

Polietileno de alta densidad (HDPE por sus siglas en inglés) es el polímero termoformable (plástico) más utilizado en el mundo. En Guatemala es el segundo más utilizado. Por su parte, moldeado por inyección es uno de los procesos de transformación de plásticos más utilizados en el mundo, con más apoyo en investigación y desarrollo para generar nuevos avances; así también es uno de los más utilizados por la industria guatemalteca. Sin embargo, HDPE presenta un problema llamado fenómeno de torsión. Éste se da por efectos de nucleación en la matriz del polímero y tiene consecuencias catastróficas, distorsionando las dimensiones de los artículos inyectados que a su vez no podrán ser reutilizados. Este fenómeno se genera con la presencia de algunos pigmentos, que inducen torsión. Asimismo se puede tener el problema en otros plásticos, como polipropileno por ejemplo, pero en menor grado.

Actualmente, en Guatemala, se tienen muchas pérdidas económicas y se comenten muchos errores al producir artículos en HDPE debido al efecto que el fenómeno de torsión presenta. Por la misma causa se han dejado de producir artículos en colores variados debido, simplemente, a la desconfianza y desconocimiento del impacto que algunos pigmentos estándar, orgánicos e inorgánicos, generan debido a la torsión en dicho polímero.

La falta de información acerca del fenómeno de torsión y del impacto que generan muchos pigmentos es escasa, en forma generalizada. Es decir, a nivel mundial se tiene muy poca literatura escrita o disponible en la Internet. Además, el fenómeno de torsión no es inducido únicamente por los pigmentos sino también por el proceso, es decir, perfil de temperaturas, presión en el molde y en el tornillo y velocidad de enfriamiento de la pieza fabricada.

En este trabajo se evaluaron ocho (8) pigmentos, cuatro (4) orgánicos y cuatro (4) inorgánicos, muy utilizados en formulaciones para el desarrollo de colores de la industria plástica guatemalteca. Se determinó experimentalmente que los pigmentos inorgánicos no tienen gran influencia sobre el encogimiento en las dimensiones de piezas inyectadas en HDPE. Sin embargo, se observó que los pigmentos orgánicos tienen una influencia negativa sobre las dimensiones de las piezas inyectadas, generando torsión.

Se determinó que el grado de torsión de todos los pigmentos evaluados, incluyendo la muestra de calibración (HDPE virgen incoloro) es de primer orden, es decir, grado 1. En este caso se pueden usar todos los pigmentos sin tener problemas de torsión, para las condiciones de operación especificadas. Lo cierto es que los pigmentos orgánicos tienen mayor influencia sobre las piezas inyectadas para generar torsión que los inorgánicos, en forma creciente a la concentración de aplicación utilizada.

Se demostró que los pigmentos a base de ftalocianina (azul y verde ftalocianinas), son los pigmentos orgánicos que más influencia tienen sobre artículos inyectados en HDPE. Sin embargo, se comprobó que, si bien es cierto que los pigmentos orgánicos tienen cierta influencia en la deformación,

se genera más torsión cuando no se ajustan los ciclos de inyección de tal manera que el artículo salga casi frío, o con temperatura cercana al ambiente. Por ello se recomienda seleccionar cuidadosamente los pigmentos utilizados, así como tener un control estricto sobre el ciclo de inyección utilizado sacrificando así el nivel de productividad, por la calidad de los productos transformados. Si no es económicamente viable sacrificar la productividad, se debe limitar el uso de pigmentos base ftalocianinas, como azul y verde, que inducen torsión.

## II. ANTECEDENTES

El término plástico, en su significación más general, se aplica a las sustancias de distintas estructuras y naturalezas que carecen de un punto fijo de ebullición y poseen durante un intervalo de temperaturas propiedades de elasticidad y flexibilidad que permiten moldearlas y adaptarlas a diferentes formas y aplicaciones. Sin embargo, en sentido restringido, denota ciertos tipos de materiales sintéticos obtenidos mediante fenómenos de polimerización o multiplicación artificial de los átomos de carbono en las largas cadenas moleculares de compuestos orgánicos derivados del petróleo y otras sustancias naturales. (Harper, 2000:1.1-1.4)

### A. Etimología e historia de los plásticos

El vocablo plástico deriva del griego *plastikos*, que se traduce como moldeable. Los polímeros, se hallan presentes en estado natural en algunas sustancias vegetales y animales como el caucho, la madera y el cuero, si bien en el ámbito de la moderna tecnología de los materiales tales compuestos no suelen encuadrarse en el grupo de los plásticos, que se reduce preferentemente a preparados sintéticos. (Harper, 2000:1.1-1.4)

El primer plástico se origina como resultado de un concurso realizado en 1860, cuando el fabricante estadounidense de bolas de billar Phelan and Collander ofreció una recompensa de 76,500 quetzales, en valor de esa época, a quien consiguiera un sustituto aceptable del marfil natural, destinado a la fabricación de bolas de billar. Una de las personas que compitieron fue el inventor norteamericano Wesley Hyatt, quien desarrolló un método de procesamiento a presión de la piroxilina, un nitrato de celulosa de baja nitración tratado previamente con alcanfor y una cantidad mínima de disolvente de alcohol. Si bien Hyatt no ganó el premio, su producto, patentado con el nombre de celuloide, se utilizó para fabricar diferentes objetos. (Harper, 2000:1.1-1.4)

En la década del 30, algunos químicos ingleses descubrieron que el gas etileno polimerizaba bajo la acción del calor y la presión, formando un termoplástico al que llamaron polietileno (PE). Hacia los años 50 aparece el polipropileno (PP). Al reemplazar en el etileno un átomo de hidrógeno por uno de cloruro se produjo el cloruro de polivinilo (PVC), un plástico duro y resistente al fuego, especialmente adecuado para cañerías de todo tipo. Al agregarles diversos aditivos se logra un material más blando, sustitutivo del caucho, comúnmente usado para ropa impermeable, manteles, cortinas y juguetes. Un plástico parecido al PVC es el politetrafluoretileno (PTFE), conocido popularmente como teflón y usado para rodillos y sartenes antiadherentes. (Harper, 2000:1.1-1.4)

Otro de los plásticos desarrollados en los años 30 en Alemania fue el poliestireno (PS), un material muy transparente comúnmente utilizado para vasos, potes y hueveras. El poliestireno expandido (EPS), una espuma blanca y rígida, es usado básicamente para embalaje y aislante térmico. También en los años 30 se crea la primera fibra artificial, el nylon. Su descubridor fue el químico Wallace Carothers,

que trabajaba para la empresa Dupont. Descubrió que dos sustancias químicas como el hexametildiamina y ácido adípico, formaban polímeros que bombeados a través de agujeros y estirados formaban hilos que podían tejerse. Su primer uso fue la fabricación de paracaídas para las fuerzas armadas estadounidenses durante la Segunda Guerra Mundial, extendiéndose rápidamente a la industria textil en la fabricación de medias y otros tejidos combinados con algodón o lana. Al nylon le siguieron otras fibras sintéticas como por ejemplo el orlón y el acrilán. (Harper, 2000:1.1-1.4)

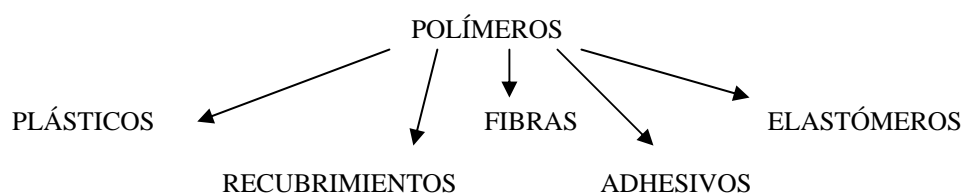
En las últimas dos décadas, principalmente en lo que tiene que ver con el envasado en botellas y frascos, se ha desarrollado vertiginosamente el uso del tereftalato de polietileno (PET), material que viene desplazando al vidrio y al PVC en el mercado de envases. (Harper, 2000:1.1-1.4)

## B. Características generales de los plásticos

La materia está formada por moléculas que pueden ser de tamaño normal o moléculas gigantes llamadas polímeros. Los polímeros se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diferentes. Algunas parecen fideos, otras tienen ramificaciones, otras, globos, etc. Algunas se asemejan a las escaleras de mano y otras son como redes tridimensionales. Es necesario resaltar que un homopolímero está formado por unidades monoméricas idénticas (por ejemplo, el polietileno), los copolímeros están constituidos, al menos, por dos monómeros diferentes. Existen también los terpolímeros, que los constituyen tres monómeros diferentes. (Harper, 2000:1.1-1.4)

Los plásticos se caracterizan por una relación resistencia/densidad alta, unas propiedades excelentes para el aislamiento térmico y eléctrico y una buena resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes. Las enormes moléculas de las que están compuestos pueden ser lineales, ramificadas o entrecruzadas, dependiendo del tipo de plástico. Las moléculas lineales y ramificadas son termoplásticas (se ablandan con el calor), mientras que las entrecruzadas son termoendurecibles (se endurecen con el calor). (Kaplan, 1999:B150-B210)

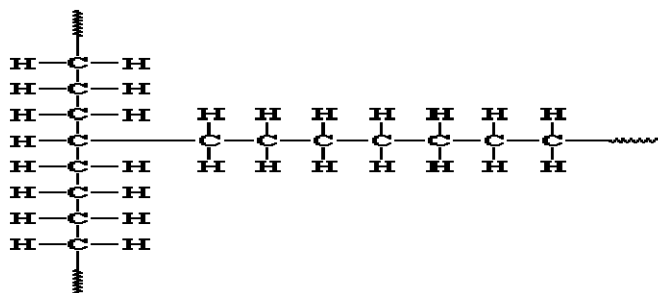
La mayor parte de los polímeros que usamos en nuestra vida diaria son materiales sintéticos con propiedades y aplicaciones variadas. Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas. En general, los polímeros tienen una muy buena resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases, aunque las más comunes son las fuerzas de Van der Waals. Las aplicaciones de los polímeros se pueden resumir de la siguiente manera: (Kaplan, 1999:B125-B210)



## C. Polietilenos

Se denomina polietileno a cada uno de los polímeros del etileno. La fabricación de polímeros consume el 60 % del etileno que se produce. El polietileno es probablemente el polímero que más se ve en la vida diaria, el más popular del mundo. Existen, básicamente, tres tipos de polietileno: (Kaplan, 1999:1.1-1.79)

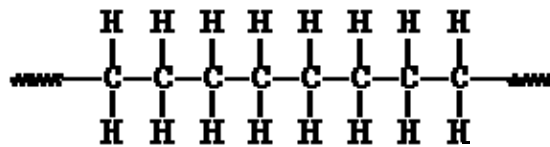
1. Polietileno de baja densidad (Low Density PolyEthylene, LDPE). Éste es un polímero de cadena ramificada. Se obtiene por polimerización del etileno a altas presiones (aproximadamente 1200 atm y 200 °C) con oxígeno o catalizador de peróxido y por mecanismo de radicales libres. Es un sólido más o menos flexible, según el grosor, ligero y buen aislante eléctrico. Se trata de un material plástico que, por sus características y bajo coste, se utiliza mucho en envasado, revestimiento de cables y en la fabricación de tuberías. La estructura ramificada de LDPE puede esquematizarse de la siguiente manera: (Harper, 2000:1.1-1.79)



2. Polietileno lineal de baja densidad (Linear Low Density PolyEthylene, LLDPE). Éste se obtiene polimerizando el etileno con un alqueno (especialmente 1-buteno) a baja presión, en disolución, suspensión o fase gaseosa y en presencia de catalizadores. Se trata de un polímero con ramificaciones muy cortas y uniformes que hacen que su temperatura de fusión y su resistencia a la tracción y al agrietamiento sean superiores a las del polietileno de baja densidad. Se utiliza en el recubrimiento de cables y en la fabricación de objetos moldeados por extrusión o soplado. (Harper, 2000:1.1-1.79)

3. Polietileno de alta densidad (High Density PolyEthylene, HDPE). Éste será el polímero de nuestro interés. Es una resina de cadena lineal no ramificada. Se obtiene por polimerización del etileno a presiones relativamente bajas (1-200 atm), con catalizador alquilmetálico (catálisis de Ziegler) o un óxido metálico sobre sílice o alúmina (procesos Phillips y Standard Oil). Su resistencia química y térmica, así como su opacidad, impermeabilidad y dureza son superiores a las del polietileno de baja densidad. Se emplea en la construcción y también para fabricar prótesis, envases, bombonas para gases y contenedores de agua y combustible. El HDPE se produce normalmente con

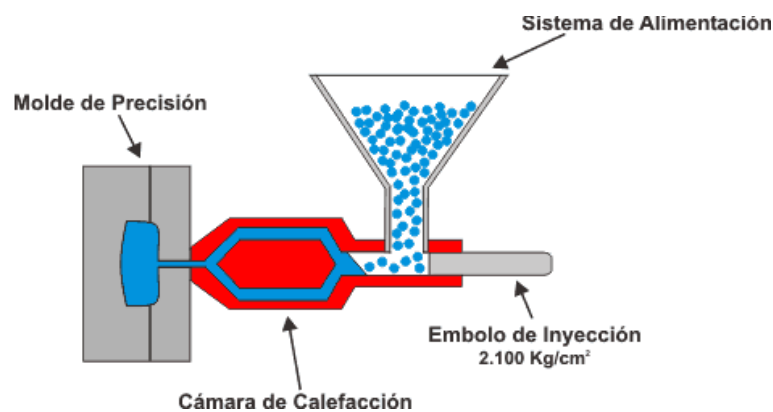
una masa molar que se encuentra en el rango entre 200.000 y 500.000, pero puede ser mayor. La estructura lineal de HDPE se puede esquematizar de la siguiente manera: (Harper, 2000:1.1-1.79)



Por último, puede generarse un cuarto tipo de polietileno, no oficial, el polietileno de masa molecular ultra-alto (Ultra High Molecular Weight PolyEthylene UHMWPE). En esta categoría entran los polietilenos con masas molares entre 3.000.000 y 6.000.000. Con este tipo de material se producen fibras, tan fuertes, que pueden utilizarse para fabricar chalecos a prueba de balas. (Kaplan, 1999:B150-B210)

#### D. Proceso de moldeo por inyección

Éste es el proceso de transformación de plásticos, donde la materia prima se calienta en un cilindro de presión que inyecta el plástico fundido, a través de una boquilla, en la cavidad de un molde provisto de un sistema de refrigeración que solidifica rápidamente en plástico inyectado; un sistema automático expulsa la pieza fuera del molde. El ciclo de inyección depende del tipo de maquinaria y del tamaño del molde a utilizar, aunque por lo general son escasos segundos. El siguiente esquema es la forma muy general de una inyectora; en este caso es de 199.09 MPa de presión de cierre. (Perry, 1999)



#### E. Fenómeno de torsión en HDPE

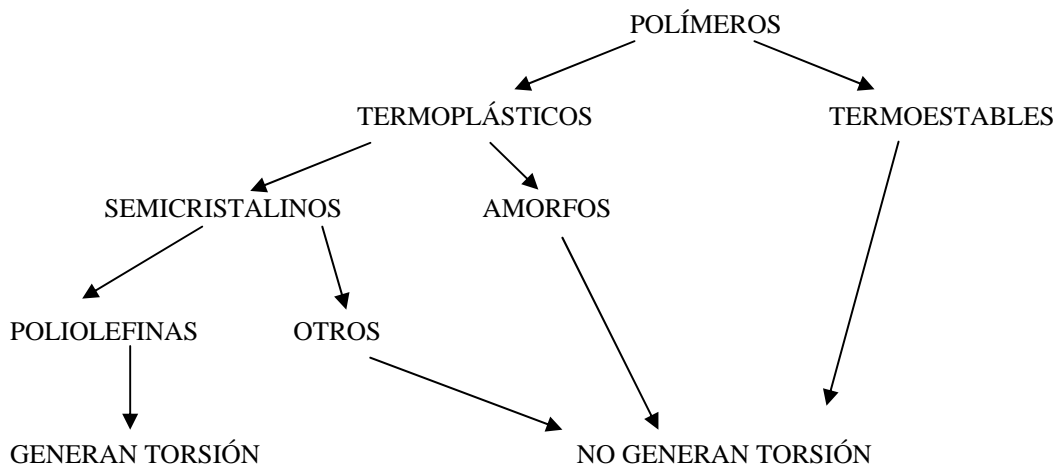
El encogimiento de piezas moldeadas por inyección en HDPE, es inherente al proceso de moldeo por inyección y ocurre por reajuste de las cadenas del polímero en una matriz cristalina particular cuando se enfría, donde se requiere menos espacio que en el polímero fundido. Este fenómeno es normal y es bien conocido por los procesadores de plásticos y no tiene problema cuando el encogimiento es homogéneo. Sin embargo, algunos pigmentos hacen que el encogimiento del plástico sea heterogéneo a través del proceso de moldeo, debido en sí a la reorientación del polímero en la

dirección del flujo y las diferencias cristalinas inducidas por las tasas diferentes de enfriamiento en el molde. A esta diferencia en el encogimiento del polímero al recristalizar se le conoce como fenómeno de torsión (Zweifer, 2001).

El fenómeno de torsión es influenciado por las características del polímero, geometría del artículo moldeado, las condiciones de procesamiento en el moldeo y enfriamiento y los aditivos así como los pigmentos utilizados. La mutua interacción entre estos diferentes factores es compleja y muy difícil de predecir. (Zweifer, 2001)

Sin embargo, algunos pigmentos aceleran la cristalización de los polímeros, en comparación a la cristalización normal del plástico sin colorear. Como consecuencia de este proceso se genera un estrés en el mismo y las macromoléculas reorientadas por este estrés se enfrían antes que cuando se da una relajación de las mismas. Finalmente, el artículo plástico distorsiona las dimensiones de la pieza provocando una deformación en la misma. Por supuesto, el fenómeno es más marcado cuando la rigidez del artículo es menor, es decir no se tienen fuerzas que impidan la deformación del artículo por ser poco simétricas. (Zweifer, 2001)

Otras poliolefinas como LDPE y PP, teniendo características morfológicas y cinética de cristalización diferentes, pueden incluso presentar deformaciones debidas al fenómeno de torsión pero no son tan problemáticas como en HDPE. En el siguiente esquema se muestra una clasificación de los polímeros que generan torsión: (Zweifer, 2001)



## F. Pigmentos

En términos generales, las sustancias que imparten color se llaman “colorantes”. Estos pueden subdividirse en algunos tipos: (Müller, 2003)

- Productos orgánicos e inorgánicos, de acuerdo a su composición química.
- Tintas y pigmentos, de acuerdo a la solubilidad en el medio que los rodea.

- Blancos, coloreados, negros, brillantes, fluorescentes, dependiendo de las condiciones colorísticas que tengan. (Harris, 1999)

Es necesario resaltar que los pigmentos se caracterizan por un nombre genérico llamado “índice de color” (C.I. por sus siglas en inglés). Éste es un sistema de nomenclatura internacionalmente conocido para los pigmentos y tintas y es publicado por la *Society of Dyers and Colourists*, en Bradford, Inglaterra, en conjunto con la *American Association of Textile Chemist and Colorists*. El sistema indica el nombre del pigmento, acorde al color que tiene (por ejemplo, P.G. es Pigment Green), seguido de un número que indica la tonalidad general, separado de una coma seguida de un número de acuerdo al correlativo asignado. De dicha manera se hará mención acá a los pigmentos a evaluar. (Harris, 1999)

Los pigmentos, a diferencia de las tintas o colorantes, son insolubles en el medio circulante y su efecto óptico se da debido a la selectividad en la absorción de luz en conjunto con la dispersión de luz. En este grupo no se incluyen pigmentos, que aunque imparten color, no son utilizados para dichos fines sino por otras propiedades; por ejemplo, existen pigmentos que se utilizan por sus efectos anticorrosivos o magnéticos y no específicamente por el color que impartan. (Müller, 2003)

Los pigmentos inorgánicos son, como su nombre lo indica, pigmentos de forma inorgánica que en general pueden clasificarse en su mayoría como óxidos metálicos. Por lo general, son pigmentos con menor resistencia a solventes, menor poder tinte y el espectro de color en éstos es más limitado que los orgánicos. Obviamente existen excepciones a la regla. Sin embargo, su reología es más ventajosa que los orgánicos. (Endriss, 1998)

A continuación los cuatro (4) pigmentos inorgánicos a evaluar:

- **Pigmentos azul 29, 77007.** Conocido como azul ultramar, es un silico-aluminato de sodio polisulfurado. Este pigmento es la forma sintética de la lazurita. Posee un limpio y brillante matiz azul rojizo, lo que le caracteriza de los restantes pigmentos azules existentes en el mercado y lo hace especialmente atractivo. Pero, además de esa coloración tan característica, es un excelente corrector de blancos y neutralizante de tonos amarillentos. No da lugar a metamerismo (diferencias de color según el iluminante), lo cual es un importante valor añadido. Esta característica blanqueante es valorada en muchos campos de aplicación como detergentes, plásticos y pinturas. (Endriss, 1998)

- **Pigmento rojo 104, 77605.** Conocido como Rojo Molibdeno, es una mezcla de cristales de cromato de plomo, sulfatos de plomo y molibdatos de plomo, con un rango colorístico de rojo amarillento a rojo azulado. La fórmula más general es  $Pb(Cr,S,Mo)O_4$ . Tiene una fórmula tetragonal. Tiene aplicaciones para pigmentar pinturas y plásticos para la industria automotriz, arquitectónica e industrial. (Endriss, 1998)

- **Pigmento verde 17, 77288.** El óxido de cromo (III) ( $Cr_2O_3$ ) es un sólido verde. Es un pigmento inorgánico con un matiz verde oliva que aporta muy buena opacidad. Entre sus propiedades principales se encuentran, excelente resistencia a los álcalis y cementos, alta resistencia a la

temperatura, solidez a la luz e intemperie. Sus aplicaciones más importantes se dan en coloración de pinturas y plásticos. (Endriss, 1998)

- **Pigmento amarillo 42, 77492.** Este pigmento es un óxido de hierro amarillo. La fórmula general es la alfa-FeOOH. Es un hidróxido de hierro que contiene como máximo el 60 % de metal. Se distingue por su color amarillo y por su forma de estalactita o bien terrosa. En este caso el contenido de óxido de hierro amarillo ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) se encuentra entre 85 y 87 %, sin embargo el hidróxido de hierro va de 96 a 97 %. Este es un compuesto que no existe en la naturaleza y debe ser sintetizado químicamente. Tiene aplicaciones en pinturas y plásticos. En éste último no puede ser utilizado a temperaturas mayores a 240 °C.(Endriss, 1998)

Las fórmulas de pigmentos orgánicos están compuestas, en su mayoría, por carbonos, característica de química orgánica. En su mayoría son derivados de ftalocianinas y sus sales. Con éstos se logra un tipo de acabado mucho más transparente que en donde intervienen típicos representantes inorgánicos. Son de partículas menores, tienen una superficie mayor y por eso su alto poder colorante. A continuación los cuatro (4) pigmentos orgánicos a evaluar: (Herbst, 1999)

- **Pigmento azul 15:1, 74160.** También conocido como azul ftalocianina. En este caso es una ftalocianina de cobre. En especial este tipo de azul tiene un color azul rojizo característico. Además, tiene un poder tinctorial fuerte y provee un rendimiento colorístico muy grande, por lo cual conlleva ahorros económicos. Se le utiliza en su mayoría en pinturas, plásticos y tintas de impresión. Presenta una alta resistencia a solventes orgánicos, excelente resistencia a la luz e intemperie, alta resistencia a la temperatura y además tiene un precio cómodo en el mercado. (Herbst, 1999)

- **Pigmento rojo 254, 56110.** Éste es un pigmento conocido como rojo DPP (Diketopyrrole-Pyrrol). Es un pigmento heterocíclico. Tiene excelentes propiedades para resistencia a solventes orgánicos. Además, puede utilizarse en procesos de altas temperaturas. Su poder tinctorial es muy fuerte, y es un rojo amarillento limpio. Las aplicaciones más comunes son en la industria plástica y de pinturas. (Herbst, 1999)

- **Pigmento Verde 7, 74260.** A éste se le conoce como verde ftalocianina, presenta un tono verde azulado. Tiene buenas propiedades de estabilidad a la luz, intemperie, temperatura y a solventes orgánicos. Sus campos de aplicación grandes son en pinturas, plásticos y tintas de impresión. Debe notarse que, aunque su poder tinctorial es muy fuerte, es más débil que azul ftalocianina. El problema más usual que se tiene en la industria de plásticos es que induce torsión en HDPE y además es difícil de dispersar en poliolefinas. (Herbst, 1999)

- **Pigmento Amarillo 62.** Éste es un pigmento mono azo, orgánico proveniente de la reacción de las sales de diazonio con arilidas acetoacéticas, a base de Calcio. Se utiliza en la industria de plástico donde produce colores amarillos en la escala rojiza – amarillenta. La resistencia a los solventes orgánicos es la promedio. Además, presenta una resistencia a la temperatura de 260 °C durante 5 minutos. Su poder tinctorial no es muy fuerte. El pigmento se puede utilizar en poliolefinas como en poliuretanos y poliestirenos. (Herbst, 1999)

La experiencia ha mostrado que los pigmentos inorgánicos no tienen influencia en efectos de distorsión de HDPE cuando es moldeado por inyección, pero que la mayoría de pigmentos orgánicos sí. La teoría sugiere que los pigmentos interfieren en la cinética de cristalización y la estructura morfológica del enfriamiento del polímero. (Phone, 2005:1-2)

Los pigmentos pueden ser divididos en tres grupos, dependiendo de la influencia en el fenómeno de torsión de HDPE moldeado por inyección:(Phone, 2005:1-2)

1. No genera torsión: No tiene influencia significativa ya sea en pruebas de laboratorio o en la práctica. Estos indican de 0 a 10 % de torsión.
2. Poca torsión: Poca influencia, detectada en laboratorio, pero que puede utilizarse en la práctica. Se detecta con porcentajes de torsión de 11 a 20 %.
3. Mucha torsión: La influencia es grande y se detecta en pruebas de laboratorio y en la práctica, por lo que no es recomendable su aplicación en la industria. Los porcentajes de torsión presentados son de 21 a 100 %. (Phone, 2005:1-2)

## G. Métodos de evaluación de torsión

- **Método de disco.** El método de disco está basado en la medida de la distorsión de un disco moldeado por inyección después de haberse sumergido en un baño de agua caliente. Los discos son producidos por moldeo por inyección en la parte central. La distorsión se mide con relación a la dirección radial y el flujo tangencial al disco. (Ciba Specialty Chemicals, 2000:1-5)

El fenómeno de torsión se mide desde el suelo o una plataforma base hasta el pico del disco, pues éste por distorsión se deforma no quedando en forma plana. La medición se observa solamente con relación a la altura que existe entre la base y el pico del disco. No se puede medir en forma proporcional. (Ciba Specialty Chemicals, 2000:1-5)

- **Método del plato o chip.** Éste es el método a utilizar en el estudio. Se basa en la medición del encogimiento de los lados (ancho y largo) de un chip o plato inyectado. Las medidas son comparativas entre un plato de calibración, que es un plato inyectado con resina virgen sin color, y un chip inyectado coloreado. Los chips son producidos por moldeo por inyección, con un grosor específico. Esto asegura un flujo paralelo y un desarrollo de la orientación en la dirección del flujo. (Ciba Specialty Chemicals, 2000:1-5)

El encogimiento es medido a través del largo del plato (paralelo a la dirección de flujo) y a través del ancho del plato (perpendicular a las líneas de flujo). Con un total de diez platos de cada color y el incoloro y se realizan los cálculos de acuerdo al promedio de las medidas tomadas. El coeficiente de encogimiento se presenta en forma de porcentaje de la diferencia del largo y del ancho en relación a la diferencia del ancho del molde. La tendencia de torsión se incrementa con el incremento de la diferencia del encogimiento del largo y del ancho. (Ciba Specialty Chemicals, 2000:1-5)

### III. JUSTIFICACIÓN

Polietileno de Alta densidad (HDPE) es la segunda poliolefina más utilizada en Guatemala. Las importaciones totales de poliolefinas ascendieron a poco más de 150 000 TM durante el 2004 Guatemala, donde HDPE representó más de 41 000 TM (poco más de 27 %). Los plásticos categorizados como poliolefinas son Polietileno Lineal de Baja Densidad, Polietileno de Baja Densidad, Polietileno de Alta Densidad y Polipropileno. El polímero más utilizado para moldeo por inyección de artículos en Guatemala es HDPE y esta forma de transformación es una de las más usuales en nuestro mercado.

En el mercado nacional se producen artículos de gran tamaño en HDPE como mesas plásticas; sin embargo la gama de colores es muy reducida debido a la poca variedad de pigmentos que no inducen torsión hoy en día. Además, en artículos críticos como cajas para bebidas carbonatadas, si el color induce el fenómeno, el problema ya no se evalúa solamente como un problema de aspecto visual, sino conlleva el problema donde el artículo producido ya no es el adecuado para su uso, pues las dimensiones de las aberturas cambian y en éstas ya no se pueden colocar envases. Así también, si se inyecta una tapadera con un pigmento que induzca la deformación de la pieza, el cierre del envase para el cual fue diseñada la misma ya no es perfecto y se producen derrames de productos o descomposición del contenido por no tener un ajuste correcto al envase.

Se debe notar también que si una persona busca literatura escrita o en la Internet acerca del fenómeno de torsión, la cantidad de información es muy limitada. Además el fenómeno torsión no es inducido únicamente por los pigmentos sino también por el proceso, es decir, el perfil de temperaturas, la presión en el molde y en el extrusor y la velocidad de enfriamiento de la pieza; sin embargo solamente los pigmentos serán los focos de atención del estudio. Por su lado, se invierte más dinero en reprocesos, pérdidas y estudios por parte del productor de artículos plásticos por falta de información del tema. El fenómeno se presenta también en otras resinas, como polipropileno, pero el efecto es menor que en HDPE. Por dicha razón se evaluará solamente en HDPE.

## IV. OBJETIVOS

### A. General

Determinar cualitativa y cuantitativamente la influencia que tienen ocho (8) pigmentos, utilizados por Plasticolor S.A. para la producción de masterbatch, para generar el fenómeno de torsión y modificar las dimensiones de piezas de HDPE cuando son transformadas por medio de moldeo por inyección.

### B. Específicos

1. Evaluar la torsión generada por pigmentos rojos, azules, verdes y amarillos (1 inorgánico y 1 orgánico por color), sobre una pieza, delgada y cuadrada (10 cm X 10 cm con espesor de 2 mm), moldeada por inyección.
2. Categorizar el fenómeno de torsión, sobre los pigmentos evaluados, de acuerdo a no genera torsión, poca torsión y mucha torsión.
3. Evaluar el grado de torsión de los pigmentos en cuatro dosis típicas de aplicación (0.05 %, 0.10 %, 0.20 % y 0.30 %).
4. Determinar la dosis práctica máxima libre de torsión de cada pigmento, cuando aplique.
5. Determinar un grupo químico y/o composición de los pigmentos que producen torsión.

## V. PROBLEMA A RESOLVER

El fenómeno de torsión en HDPE, cuando es moldeado por inyección, generado por el uso de algunos pigmentos para la coloración de artículos, tiene efectos catastróficos sobre los artículos. El problema principal es entender el fenómeno, identificar los pigmentos que lo causan y cuantificar la cantidad máxima permisible. Esto se resolvió estudiando a fondo el fenómeno, así también se evaluó ocho (8) pigmentos utilizados por Plasticolor S.A. en la producción de masterbatch y se clasificó los mismos de acuerdo a la torsión generada.

Los pigmentos que se evaluaron fueron los siguientes:

Cuadro No. 1. Descripción de pigmentos a utilizar en experimento

Colores	Pigmentos inorgánicos		Pigmentos orgánicos	
	Pigmento	Color Index	Pigmento	Color Index
Azules	Azul Ultramar	P.B 29, 77007	Azul Ftalocianina	P.B 15:1, 74160
Rojos	Rojo Molibdeno	P.R. 104, 77605	Rojo DPP	P.R 254, 56110
Verdes	Verde Cromo	P.G 17, 77288	Verde Ftalocianina	P.G 7, 74260
Amarillos	Oxido de Hierro	P.Y. 42, 77492	Amarillo	P.Y 62

## VI. METODOLOGÍA

### A. Trabajo de investigación

- Se investigó y documentó el fenómeno y el procesamiento de HDPE.
- Se seleccionaron ocho pigmentos a evaluar (orgánicos e inorgánicos).
- Se seleccionó el plástico y la máquina a utilizar para la experimentación.
- Se decidió evaluar los pigmentos con 0.05 %, 0.10 %, 0.20 % y 0.30 % de aplicación.

### B. Determinación del método de evaluación

- Se seleccionó el método de chip como el adecuado para el experimento.
- Se decidió utilizar un molde de 10 cm X 10 cm con 2 mm de espesor.

### C. Realización del experimento

- Se montó el molde en una inyectora Milano de 30 TM de cierre.
- Se realizó una muestra de calibración, es decir HDPE virgen, sin color donde se determinaron las medidas reales del chip inyectado.
  - Se mezclaron las proporciones de resina con el pigmento evaluado. Como las concentraciones de pigmentos fueron 0.05 %, 0.10 %, 0.20 % y 0.30 %, las concentraciones de resina fueron de 0.995 %, 0.990 %, 0.980 % y 0.970 %, respectivamente, mezclados con aceite mineral para mejor adhesión.
  - Para cada pigmento se realizó la experimentación diez veces, para obtener diez corridas y se promediaron los resultados por concentración.
  - Los parámetros de operación fueron tomados para una máquina de 30 TM de cierre, con una temperatura promedio de trabajo de 200 °C.
    - El ciclo de inyección se mantuvo en 23 segundos, con lo cual se obtuvo piezas casi frías a la salida de la máquina.
    - La temperatura del molde se mantuvo a 30 °C.
    - Después del enfriamiento se dejaron los chips al ambiente por lo menos 18 horas después de la experimentación, luego se tomaron las mediciones de encogimiento unidimensional respectivas.

### D. Evaluación de datos obtenidos

- Para cada pigmento, por concentración, se determinó el valor promedio de ancho y largo de la pieza y luego se calculó el encogimiento por lado en porcentaje de la siguiente manera:

$$\text{Encogimiento unidimensional \%} = (\text{L. Molde} - \text{L. Exp})(100 \% / \text{L. Molde})$$

- El encogimiento unidimensional se graficó con relación uno de otro, es decir encogimiento de largo con encogimiento de ancho.

- Se calculó el nivel de torsión obtenido promedio por pigmento con la siguiente fórmula:

$$\text{Nivel de torsión \%} = (\text{Enc. Largo} - \text{Enc. Ancho})(100 \% / \text{Enc. Ancho})$$

- Acorde a los resultados obtenidos se logró categorizar los pigmentos evaluados de la siguiente manera:

1. 0 – 10 % de torsión es grado 1 de torsión, lo que significa torsión mínima o despreciable.
2. 11 – 20 % de torsión es grado 2 de torsión, lo que significa torsión considerable o media, se debe trabajar con cuidado.
3. 21 – 100 % de torsión es grado 3 de torsión, lo que significa torsión extrema, no utilizar en formulaciones.

## E. Preparación de resultados finales, conclusiones y recomendaciones

- Al tener todos los resultados tabulados y graficados, se prepararon conclusiones de procesamiento, concentraciones y categorización de pigmentos de acuerdo al método utilizado.

- Se hizo recomendaciones de uso de pigmentos en HDPE para moldeo por inyección, acorde a los pigmentos evaluados.

## VII. RESULTADOS

Cuadro No. 2 Niveles de encogimiento y grados de torsión generados por los pigmentos analizados sobre una pieza inyectada de HDPE

No.	Análisis	COLOR	ENCOGIMIENTO		NIVEL DE TORSIÓN (%)	GRADO DE TORSIÓN
			Largo (%)	Ancho (%)		
1	HDPE Virgen (Calibración)	-	1.78	1.76	0.023	1
2	P.B. 29, 77007 al 0.05 %	Azul	1.26	1.26	-	0
3	P.B. 29, 77007 al 0.10 %	Azul	1.33	1.37	0.045	1
4	P.B. 29, 77007 al 0.20 %	Azul	1.38	1.47	0.102	1
5	P.B. 29, 77007 al 0.30 %	Azul	1.71	1.59	0.136	1
6	P.R. 104, 77605 al 0.05 %	Rojo	1.44	1.48	0.045	1
7	P.R. 104, 77605 al 0.10 %	Rojo	1.44	1.38	0.068	1
8	P.R. 104, 77605 al 0.20 %	Rojo	1.44	1.43	0.011	1
9	P.R. 104, 77605 al 0.30 %	Rojo	1.37	1.43	0.068	1
10	P.G. 17, 77288 al 0.05 %	Verde	1.49	1.47	0.023	1
11	P.G. 17, 77288 al 0.10 %	Verde	1.50	1.42	0.090	1
12	P.G. 17, 77288 al 0.20 %	Verde	1.46	1.42	0.045	1
13	P.G. 17, 77288 al 0.30 %	Verde	1.47	1.46	0.011	1
14	P.Y. 42, 77492 al 0.05 %	Amarillo	1.53	1.61	0.091	1
15	P.Y. 42, 77492 al 0.10 %	Amarillo	1.50	1.53	0.034	1
16	P.Y. 42, 77492 al 0.20 %	Amarillo	1.51	1.65	0.158	1
17	P.Y. 42, 77492 al 0.30 %	Amarillo	1.55	1.58	0.034	1
18	P.B. 15:1, 74160 al 0.05 %	Azul	2.23	0.99	1.393	1
19	P.B. 15:1, 74160 al 0.10 %	Azul	2.35	0.92	1.605	1
20	P.B. 15:1, 74160 al 0.20 %	Azul	2.54	0.89	1.852	1
21	P.B. 15:1, 74160 al 0.30 %	Azul	2.75	0.82	2.164	1
22	P.R. 254, 56110 al 0.05 %	Rojo	2.01	1.27	0.834	1
23	P.R. 254, 56110 al 0.10 %	Rojo	2.03	1.15	0.990	1
24	P.R. 254, 56110 al 0.20 %	Rojo	2.22	1.24	1.104	1
25	P.R. 254, 56110 al 0.30 %	Rojo	2.19	1.11	1.215	1
26	P.G. 7, 74260 al 0.05 %	Verde	1.76	0.81	1.065	1
27	P.G. 7, 74260 al 0.10 %	Verde	1.90	0.87	1.156	1
28	P.G. 7, 74260 al 0.20 %	Verde	1.94	0.72	1.366	1
29	P.G. 7, 74260 al 0.30 %	Verde	2.04	0.76	1.434	1
30	P.Y. 62 al 0.05 %	Amarillo	1.76	1.83	0.079	1
31	P.Y. 62 al 0.10 %	Amarillo	1.77	1.84	0.079	1
32	P.Y. 62 al 0.20 %	Amarillo	1.87	1.76	0.125	1
33	P.Y. 62 al 0.30 %	Amarillo	1.91	1.72	0.215	1

NOTA: El grado de torsión se clasifica de la siguiente manera:

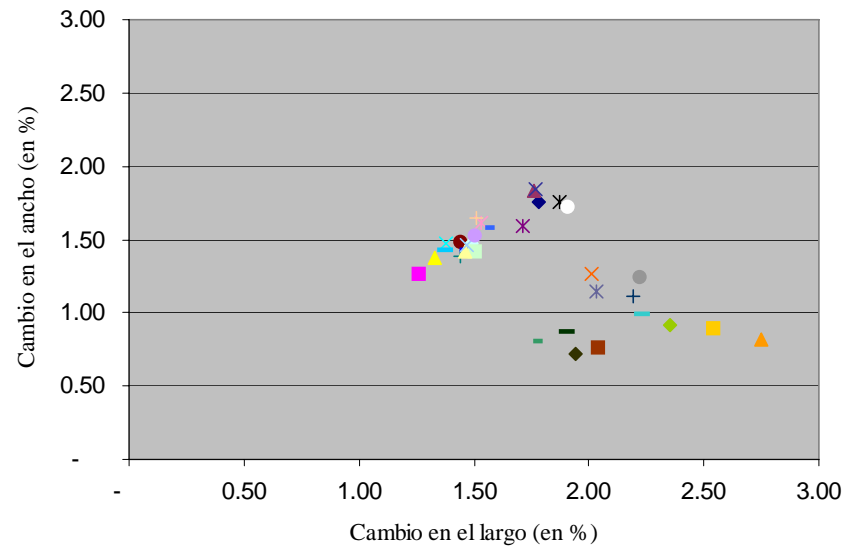
0 = No genera torsión de acuerdo al análisis experimental.

1 = Torsión mínima o despreciable, puede utilizarse.

2 = Torsión moderada o intermedia, puede utilizarse con cuidado.

3 = Torsión extrema, no debe utilizarse en artículos inyectados de HDPE.

Gráfico No 1. Cambios generados por el uso de pigmentos sobre las dimensiones de una pieza inyectada de polietileno de alta densidad (HDPE)



◆ HDPE Virgen (Calibración)	■ P.B. 29, 77007 al 0.05 %	▲ P.B. 29, 77007 al 0.10 %	× P.B. 29, 77007 al 0.20 %	✱ P.B. 29, 77007 al 0.30 %	● P.R. 104, 77605 al 0.05 %
+ P.R. 104, 77605 al 0.10 %	■ P.R. 104, 77605 al 0.20 %	■ P.R. 104, 77605 al 0.30 %	◆ P.G. 17, 77288 al 0.05 %	■ P.G. 17, 77288 al 0.10 %	▲ P.G. 17, 77288 al 0.20 %
× P.G. 17, 77288 al 0.30 %	✱ P.Y. 42, 77492 al 0.05 %	● P.Y. 42, 77492 al 0.10 %	+ P.Y. 42, 77492 al 0.20 %	■ P.Y. 42, 77492 al 0.30 %	■ P.B. 15:1, 74160 al 0.05 %
◆ P.B. 15:1, 74160 al 0.10 %	■ P.B. 15:1, 74160 al 0.20 %	▲ P.B. 15:1, 74160 al 0.30 %	× P.R. 254, 56110 al 0.05 %	× P.R. 254, 56110 al 0.10 %	● P.R. 254, 56110 al 0.20 %
+ P.R. 254, 56110 al 0.30 %	■ P.G. 7, 74260 al 0.05 %	■ P.G. 7, 74260 al 0.10 %	◆ P.G. 7, 74260 al 0.20 %	■ P.G. 7, 74260 al 0.30 %	▲ P.Y. 62 al 0.05 %
× P.Y. 62 al 0.10 %	✱ P.Y. 62 al 0.20 %	■ P.Y. 62 al 0.30 %			

Gráfico No. 2. Clasificación del nivel de torsión generado por el uso de pigmentos inorgánicos sobre las dimensiones de una pieza inyectada de HDPE

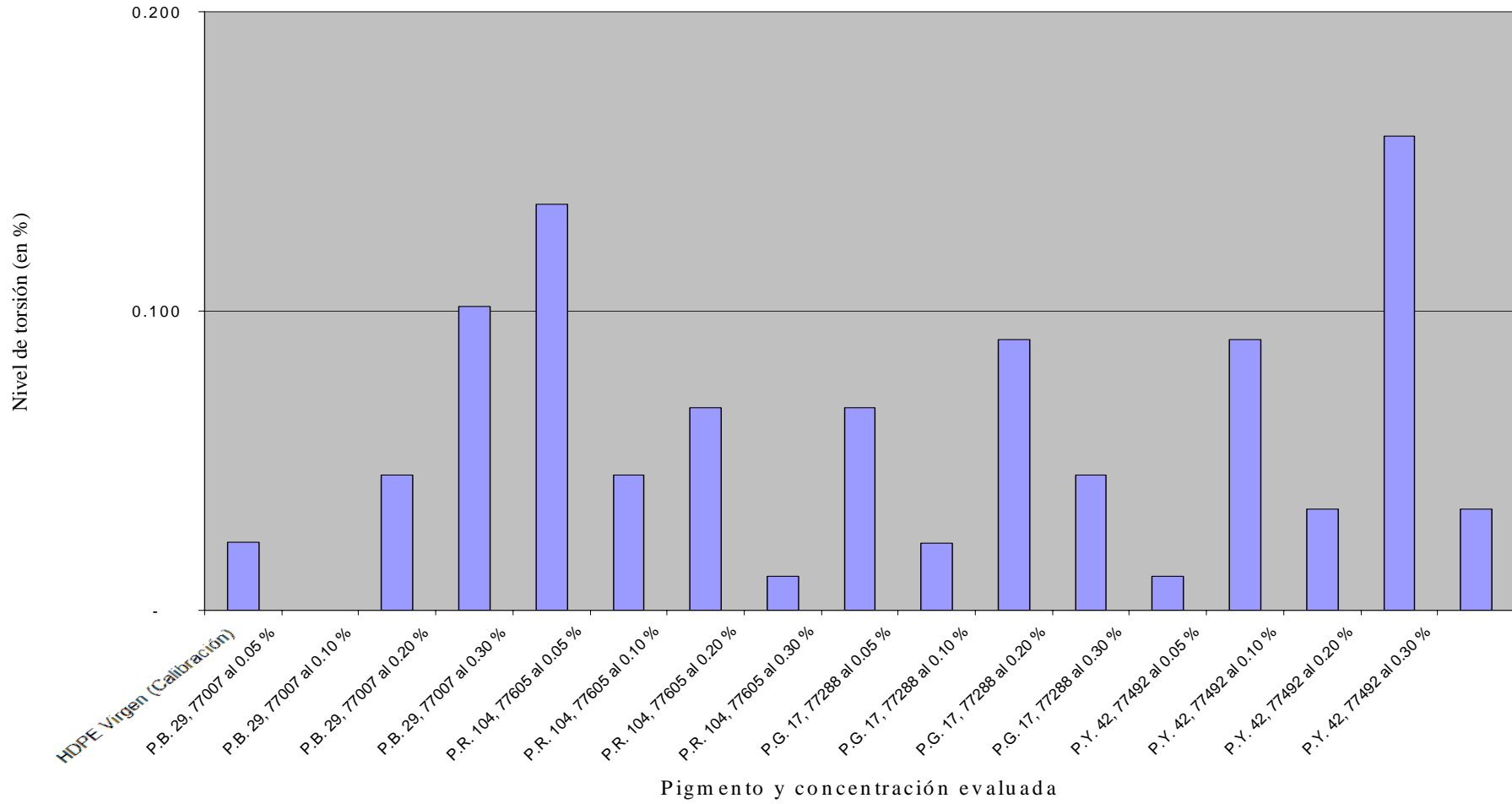


Gráfico No. 3. Clasificación del nivel de torsión generado por el uso de pigmentos orgánicos sobre las dimensiones de una pieza inyectada de HDPE

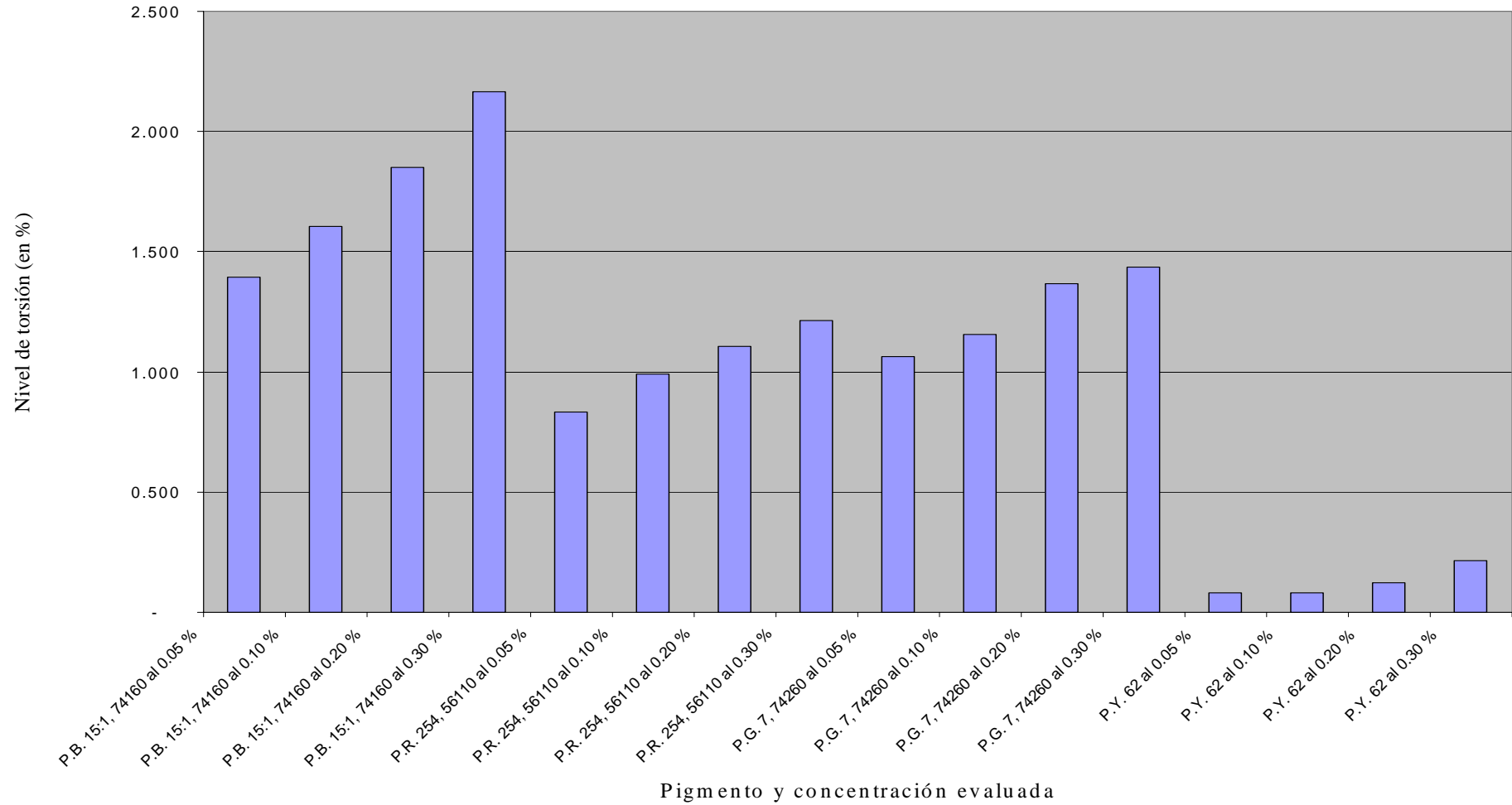


Gráfico No. 4. Comparación entre la concentración de aplicación de pigmentos inorgánicos y el nivel de torsión generado por los mismos sobre una pieza inyectada de HDPE

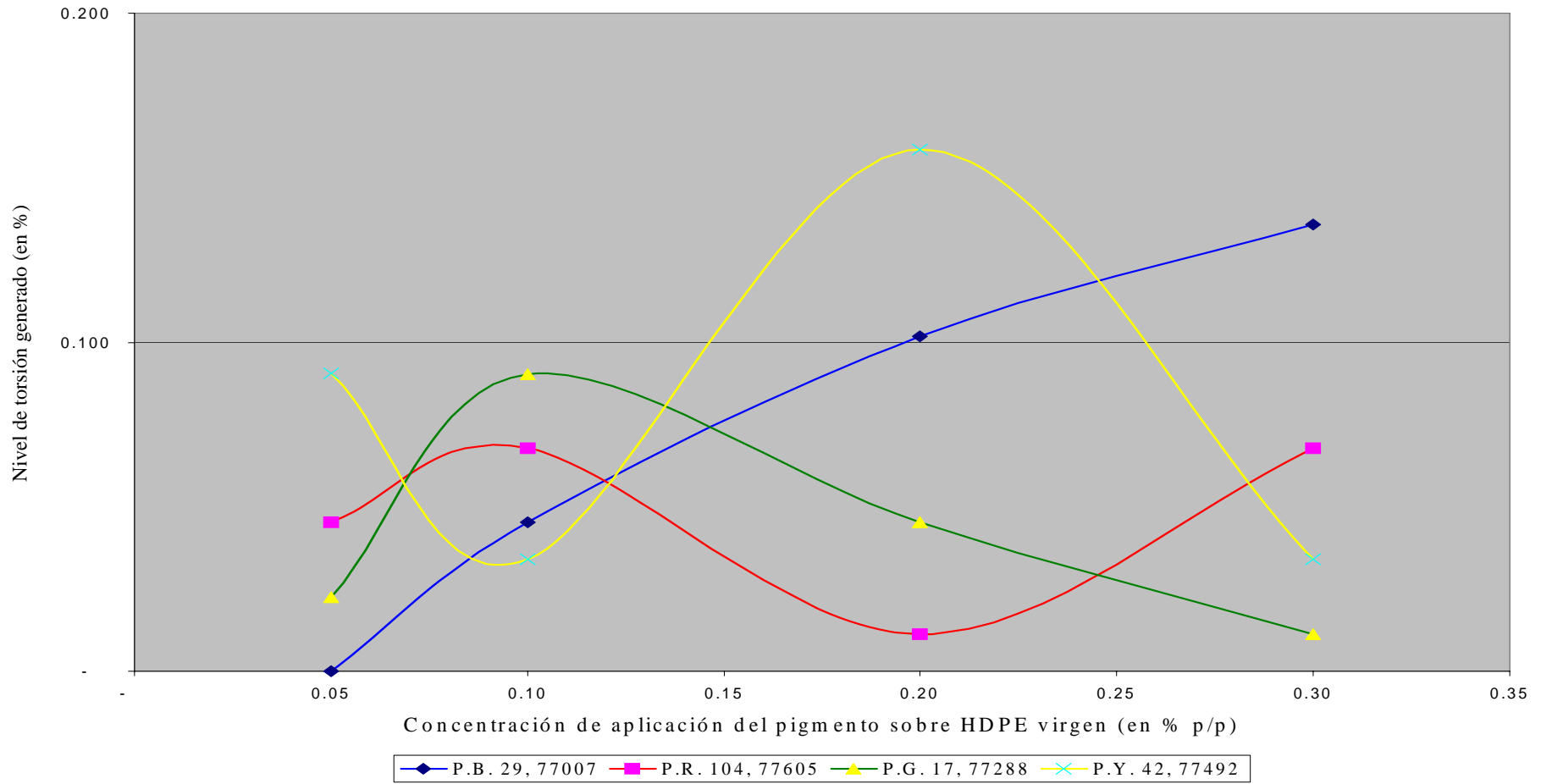
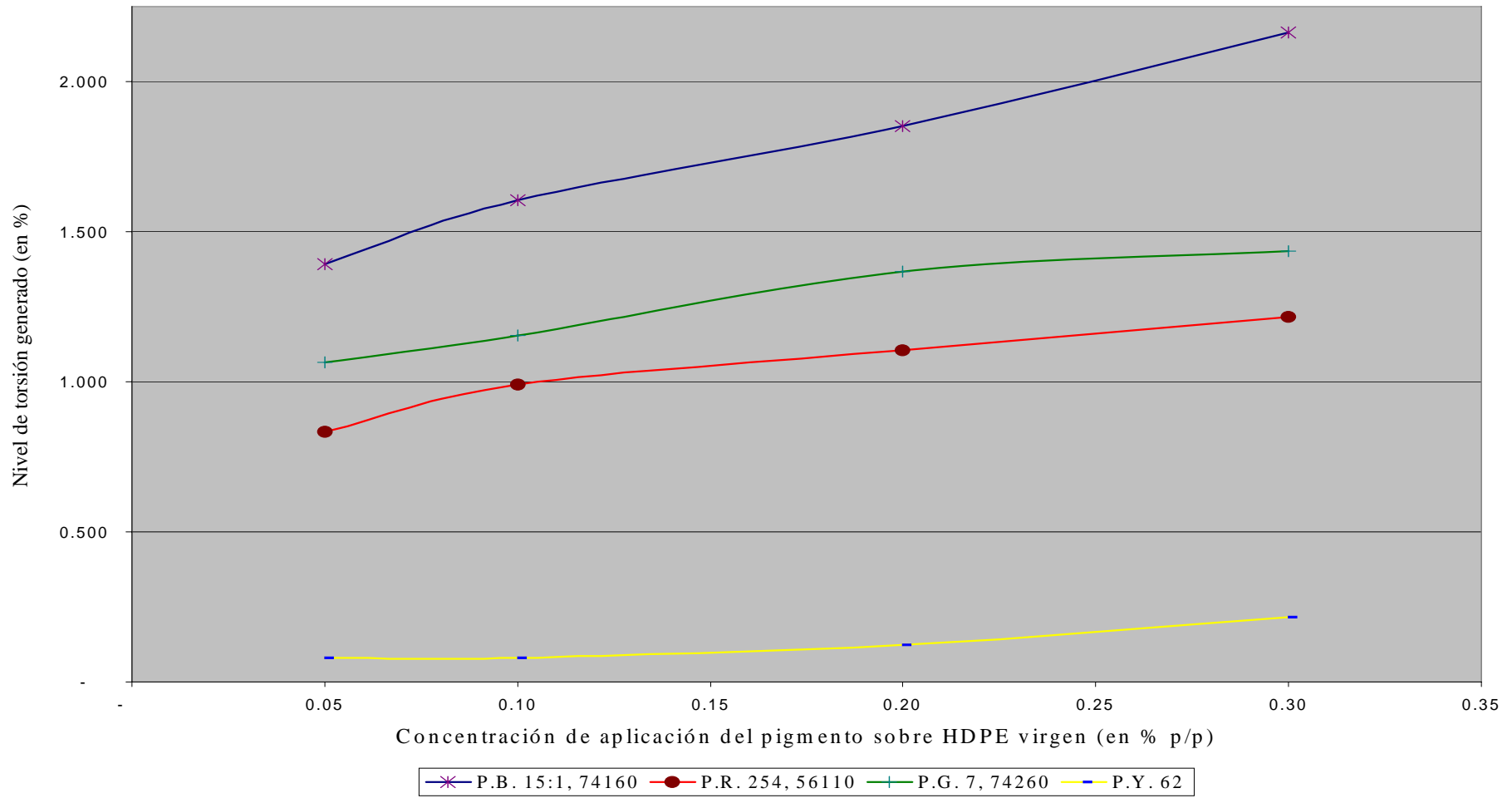


Gráfico No. 5. Comparación entre la concentración de aplicación de pigmentos orgánicos y el nivel de torsión generado por los mismos sobre una pieza inyectada de HDPE



## VIII. DISCUSIÓN

El fenómeno de torsión se presenta en polietileno de alta densidad por efectos de nucleación de la resina, influenciado en algunas ocasiones por el uso de algunos pigmentos. Sin embargo, se genera torsión también con la modificación de algunas variables del proceso. En esta ocasión se trató de manejar variables estables. Es decir, se mantuvo un perfil estable de temperaturas en las resistencias de la inyectora, o bien una temperatura estándar en todo el tornillo. En este caso, se trabajó con 200 °C de temperatura estándar en toda la inyectora. Era posible inyectar satisfactoriamente la pieza con un ciclo de 13 segundos, aunque la pieza salía muy caliente de la máquina. Para ello se mantuvo el molde a 30 °C y el ciclo se mantuvo en 23 segundos.

Al observar los resultados en el cuadro 1, se nota que todas las mediciones dieron niveles de torsión aceptables. Se puede observar también que aún la resina virgen presenta cambio en las dimensiones de las piezas. Esto era de esperarse, porque existe un re-arreglo de moléculas al solidificar de nuevo el plástico y se genera un estrés, apoyado por una variación de temperatura. Lo interesante es que todos los pigmentos inorgánicos son los que menor grado de torsión presentan, casi igual al del plástico incoloro. Con esto se puede decir que prácticamente los pigmentos inorgánicos no generan torsión, siendo de mayor influencia el nivel de encogimiento de la resina.

En la gráfica 1 se logra observar el encogimiento unidimensional, en el largo y en el ancho, de todos los pigmentos así como el de la resina virgen. En ella se nota que los pigmentos inorgánicos tienen el mismo nivel de encogimientos en las dos dimensiones y que no se encuentran tan dispersos como los pigmentos orgánicos por lo que el nivel de torsión generado de los pigmentos inorgánicos es menor que el de los pigmentos orgánicos. En los gráficos 2 y 3 se nota el nivel de torsión que existe entre los pigmentos inorgánicos y orgánicos respectivamente; en este caso se vuelve a demostrar que los pigmentos inorgánicos tienen grados de torsión despreciables en comparación con los orgánicos. En los gráficos 4 y 5 se observan los patrones de torsión de los pigmentos inorgánicos y orgánicos con respecto a la concentración de aplicación. Puede observarse que en los pigmentos inorgánicos (gráfico 4) los patrones no existen, es decir tienen comportamientos al azar, con excepción del azul ultramar que tiene un gráfico creciente-decreciente. Sin embargo en el gráfico 5 se observa que los pigmentos orgánicos sí presentan un patrón creciente con respecto a la concentración aplicada del pigmento. Es necesario mencionar que en ningún gráfico (4 y 5) se puede obtener un patrón lineal, exponencial o polinomial que pueda predecir el grado de torsión que generarán los pigmentos a utilizar.

Los resultados demuestran que los pigmentos orgánicos son los que mayor grado de torsión presentan. Se deduce de ahí que todos los pigmentos orgánicos pueden generar torsión, en mayor o menor grado. El azul y verde ftalocianina son los que mayor índice de encogimiento y torsión generan. El amarillo orgánico presenta muy poca torsión. La parte importante en los orgánicos es que sí muestran un incremento en el nivel de torsión generado por los pigmentos en relación al incremento en la concentración. El punto incierto en este caso es que, como ya se mencionó en el párrafo anterior, no

existe un parámetro lineal, ni exponencial de la variación en la torsión. No se puede deducir una fórmula para calcular la concentración máxima permisible de cada pigmento libre de torsión, ni un patrón químico exacto, solamente la generalidad de que sean pigmentos orgánicos; y que aún dentro de los pigmentos orgánicos existen diferencias de un grupo químico a otro (por ejemplo el amarillo orgánico muestreado contra el resto de orgánicos). En gran parte esto se debe al azar de la torsión. Es decir, el fenómeno se ve influenciado por los pigmentos orgánicos en mayor dimensión, pero no implica que en todas las piezas se genere la misma. Personalmente creo que el tamaño de las moléculas y los acabados superficiales de las mismas, forman focos de nucleación sobre la resina lineal e influyen en la cristalización de la misma. En el caso de los inorgánicos, por tener tamaños de moléculas menores, y por ende menor área de superficie de contacto, la tendencia a inducir torsión es mucho menor.

Hay que recordar que el problema de encogimiento se presenta también en polipropileno (PP), pero en menor grado. En este caso se sabe con certeza que no es por efecto de nucleación, sino por efectos de precrystalización de algunas moléculas. Para ajustar las piezas se utiliza un agente nucleante, que hace un re-arreglo de las moléculas y mantiene un nivel de solidificación estándar en el espacio y así no hay ajustes tridimensionales de las piezas. Sin embargo en HDPE, el problema no se puede ajustar con un agente nucleante, porque el problema se genera por efecto de nucleación. Lo que sí es interesante es que, mientras más caliente salga la pieza del molde, y se enfría con aire del ambiente, el fenómeno se agrava. Este hecho permite deducir que los pigmentos tienen una influencia negativa en las piezas de HDPE, pero las variables de proceso son las que más afectan. Se entiende como variables de proceso a la velocidad de inyección, presión de inyección, perfil de temperatura y temperatura de salida del molde. Puede entenderse que, mientras más presión tenga el molde y se enfríe en su totalidad dentro del mismo la pieza, menor grado de torsión se generará, porque no existe espacio suficiente para el re-arreglo de las moléculas y no pueden escapar del espacio limitado del molde, aunque se pierden propiedades mecánicas del plástico.

Generalmente los industriales del plástico tratan de incrementar sus niveles de productividad reduciendo los ciclos de inyección, pero no se dan cuenta que con HDPE, el problema se agrava. Lo más preocupante de este fenómeno es que, una vez generado el estrés y deformada la pieza, no puede reutilizarse el plástico. Es necesario que entiendan, que aunque se sacrifique productividad, se pueden obtener mejores piezas inyectadas en HDPE, si se procesan con buenas prácticas.

Se pensaba que la mayor influencia sobre la deformación de las piezas de HDPE se debe al efecto de los pigmentos, pero este trabajo demuestra que aún con pigmentos que generen torsión se pueden obtener piezas con poca deformación, con concentraciones hasta de 0.30 % m/m de pigmento en polvo, si se controlan bien los ciclos de inyección de tal manera que la pieza salga casi fría y sólida de la inyectora.

## IX. CONCLUSIONES

1. Todos los pigmentos evaluados, sean éstos inorgánicos u orgánicos, así como el plástico virgen incoloro, presentan grados de torsión aceptables, siendo calificados como nivel 1 de torsión.
2. Los pigmentos inorgánicos prácticamente no tienen una influencia sobre las dimensiones de piezas inyectadas de HDPE, más que los factores de encogimiento generados por las propiedades del polímero virgen.
3. Los pigmentos orgánicos, todos, presentan una influencia negativa sobre las dimensiones de piezas inyectadas de HDPE, creciente de acuerdo al incremento en la concentración de aplicación.
4. Los pigmentos orgánicos a base de moléculas de ftalocianinas, como azules y verdes, son los pigmentos orgánicos que mayor torsión generan, seguidos del rojo DPP, y por último el amarillo orgánico.
5. Bajo los estándares experimentales utilizados, es posible aplicar todos los pigmentos analizados en concentraciones hasta de 0.30 % m/m, sin que la deformación de las piezas sea extrema para que dichos objetos no sean utilizables.
6. A pesar que se ha demostrado que los pigmentos orgánicos tienen influencia sobre el encogimiento de las piezas inyectadas en HPDE, no puede descifrarse un patrón químico que explique el fenómeno.
7. El fenómeno de torsión generado en HDPE puede ser atribuido por el incremento del tamaño de los cristales, provocada por el uso de pigmentos orgánicos, así como a precrystalización y re-arreglo de moléculas debido a un estrés generado sobre la matriz del polímero. Esta última causa tiene mayores efectos negativos si no se controla debidamente la velocidad y ciclo de inyección.
8. La etapa de templado y la complejidad del molde son los dos factores de procesamiento que más influencia tienen sobre el grado de torsión que se genera en una pieza de polietileno de alta densidad cuando es moldeada por inyección.

## X. RECOMENDACIONES

1. Para poder obtener piezas inyectadas en HDPE, sin deformación, se recomienda utilizar ciclos de inyección que permitan obtener los artículos casi fríos o con temperaturas muy cercanas a la temperatura del ambiente, para evitar así la generación de más estrés sobre la resina y evitar un arreglo de los cristales.

2. Hay que tener especial cuidado al utilizar pigmentos azules y verdes orgánicos (azul y verde ftalocianinas), puesto que éstos son los que más torsión generan. Si se quieren altos niveles de productividad de piezas con ciclos de inyección menores, no se recomienda el uso de dichos pigmentos.

3. Si los pigmentos a utilizar en HDPE son nuevos, se debe solicitar al proveedor de los pigmentos las fichas técnicas y hojas de seguridad, así como la indicación si éstos pueden o no generar torsión, para realizar pruebas y ajustar el ciclo de inyección adecuado.

4. Piezas con paredes más delgadas generan más torsión, por lo que se recomienda su evaluación previa en máquina para determinar si el diseño dará problemas de encogimiento y generará deformación.

5. Se sugiere realizar un proyecto más profundo para determinar un modelo matemático sobre la influencia que los pigmentos orgánicos tienen sobre el grado de torsión que se genera sobre una pieza inyectada de polietileno de alta densidad. Éste debe ser evaluado de acuerdo a la relación de los pigmentos, complejidad de los moldes y tiempo de templado de los artículos.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

- Ciba Specialty Chemicals Inc. 2000. *Shrinkage and Distortion of Injection Moulded HDPE – Test Methods*. Basel, Suiza. 11 páginas.
- Endriss, Hartmut. 1998. *Inorganic Coloured Pigments Today*. Hannover, Alemania. Vincentz Verlag. 172 páginas
- Harper, Charles A. 2000. *Modern Plastics Handbook*. Estados Unidos. McGraw Hill Editions. 12 capítulos.
- Harris, Ronald M. 1999. *Coloring Technology for Plastics*. Nueva York, Estados Unidos de América. Plastics Design Library. 332 páginas.
- Kaplan, William A. 1996. *Modern Plastics Encyclopedia '97*. Estados Unidos. Mc Graw Hill Editions. 7 capítulos.
- Müller, Albrecht. 2003. *Coloring of Plastics*. München, Suiza. Hanser Publishers. 269 páginas.
- Perry, Robert H.; D. W. Green. 1999. *Perry's Chemical Engineers Handbook*. Estados Unidos. McGraw Hill Editions. 30 capítulos.
- Phone, Jercy. 2005. Dominion Colour Corporation. Toronto, Canadá. 4 Páginas.
- Wily, Herbst; Klaus H. 1997. *Industrial Organic Pigments*. 2ª Edición, Weinheim, Alemania. VCH. 652 páginas.
- Zweifel, Hans. 2001. *Plastics Additives Handbook*. 5ª Edición. München, Suiza. Hanser Publishers. 1148 páginas.

## XII. APÉNDICE

### A. Especificaciones de materia prima

El polietileno de Alta Densidad utilizado es el Dowlex IP-10262, de Dow Química. Es un polímero que cumple regulaciones para estar en contacto con alimentos, de acuerdo a la FDA. El índice de fluidez de esta resina es 9g/10 min.; La densidad del plástico es de 0.960g/mL. Por su lado, los pigmentos utilizados para la elaboración del experimento fueron proporcionados por PLASTICOLOR, S.A. En la tabla de debajo se detalla e código interno y descripción del pigmento:

Cuadro No. 3. Pigmentos utilizados para la experimentación

PIGMENTO	INFORMACIÓN DE PLASTICOLOR	
	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
P.B. 29, 77007	4035S	Azul Ultramar
P.R. 104, 77605	4018PP	Rojo Molibdeno
P.G. 17, 77288	4033	Verde Cromo
P.Y. 42, 77492	4024B	Oxido de Hierro Amarillo
P.B. 15:1, 74160	4034	Azul Ftalocianina
P.R. 254, 56110	4012CG	Rojo DPP
P.G. 7, 74260	4032	Verde Ftalocianina
P.Y. 62	4031	Amarillo Orgánico

### B. Datos originales

Cuadro No. 4 Especificaciones estándar para análisis realizado

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
Ancho molde	cm	10
Largo molde	cm	10
Espesor molde	mm	2
Presión inyectora	MPa	2,844.14
Temperaturas inyectora	°C	200
Temperatura molde	°C	30
Ciclo de inyección	s	23
Concentración 1	% p/p	0.05
Concentración 2	% p/p	0.10
Concentración 3	% p/p	0.20
Concentración 4	% p/p	0.30
Mediciones por color	Corridas	10

**Nota:** Debido al largo de los nombres de cada muestra realizada, en esta sección se da una nomenclatura abreviada.

Cuadro No. 5 Mezclas reales realizadas para cada análisis

DESCRIPCIÓN DE ANÁLISIS	CÓDIGO	MASAS MEZCLADAS ( g ± 0.005 )		
		HDPE	Pigmento	Total
HDPE Virgen (Calibración)	HDEP	1,100.00	-	1,100.00
P.B. 29, 77007 al 0.05 %	Az.I.0.05 %	1,099.45	0.55	1,100.00
P.B. 29, 77007 al 0.10 %	Az.I.0.10 %	1,098.90	1.10	1,100.00
P.B. 29, 77007 al 0.20 %	Az.I.0.20 %	1,097.80	2.20	1,100.00
P.B. 29, 77007 al 0.30 %	Az.I.0.30 %	1,096.70	3.30	1,100.00
P.R. 104, 77605 al 0.05 %	R.I.0.05 %	1,099.45	0.55	1,100.00
P.R. 104, 77605 al 0.10 %	R.I.0.10 %	1,098.90	1.10	1,100.00
P.R. 104, 77605 al 0.20 %	R.I.0.20 %	1,097.79	2.21	1,100.00
P.R. 104, 77605 al 0.30 %	R.I.0.30 %	1,096.70	3.30	1,100.00
P.G. 17, 77288 al 0.05 %	V.I.0.05 %	1,099.45	0.55	1,100.00
P.G. 17, 77288 al 0.10 %	V.I.0.10 %	1,098.90	1.10	1,100.00
P.G. 17, 77288 al 0.20 %	V.I.0.20 %	1,097.80	2.20	1,100.00
P.G. 17, 77288 al 0.30 %	V.I.0.30 %	1,096.70	3.30	1,100.00
P.Y. 42, 77492 al 0.05 %	Am.I.0.05 %	1,099.45	0.55	1,100.00
P.Y. 42, 77492 al 0.10 %	Am.I.0.10 %	1,098.90	1.10	1,100.00
P.Y. 42, 77492 al 0.20 %	Am.I.0.20 %	1,097.80	2.20	1,100.00
P.Y. 42, 77492 al 0.30 %	Am.I.0.30 %	1,096.70	3.30	1,100.00
P.B. 15:1, 74160 al 0.05 %	Az.O.0.05 %	1,099.45	0.55	1,100.00
P.B. 15:1, 74160 al 0.10 %	Az.O.0.10 %	1,098.90	1.10	1,100.00
P.B. 15:1, 74160 al 0.20 %	Az.O.0.20 %	1,097.80	2.20	1,100.00
P.B. 15:1, 74160 al 0.30 %	Az.O.0.30 %	1,096.70	3.30	1,100.00
P.R. 254, 56110 al 0.05 %	R.O.0.05 %	1,099.45	0.55	1,100.00
P.R. 254, 56110 al 0.10 %	R.O.0.10 %	1,098.90	1.10	1,100.00
P.R. 254, 56110 al 0.20 %	R.O.0.20 %	1,097.80	2.20	1,100.00
P.R. 254, 56110 al 0.30 %	R.O.0.30 %	1,096.70	3.30	1,100.00
P.G. 7, 74260 al 0.05 %	V.O.0.05 %	1,099.45	0.55	1,100.00
P.G. 7, 74260 al 0.10 %	V.O.0.10 %	1,098.90	1.10	1,100.00
P.G. 7, 74260 al 0.20 %	V.O.0.20 %	1,097.80	2.20	1,100.00
P.G. 7, 74260 al 0.30 %	V.O.0.30 %	1,096.70	3.30	1,100.00
P.Y. 62 al 0.05 %	Am.O.0.05 %	1,099.45	0.55	1,100.00
P.Y. 62 al 0.10 %	Am.O.0.10 %	1,098.90	1.10	1,100.00
P.Y. 62 al 0.20 %	Am.O.0.20 %	1,097.80	2.20	1,100.00
P.Y. 62 al 0.30 %	Am.O.0.30 %	1,096.70	3.30	1,100.00

Cuadro No. 6 Largo experimental medido sobre la pieza inyectada de HDPE ( cm  $\pm$  0.005 )

CORRIDA	HDEF	AzI.0.05 %	AzI.0.10 %	AzI.0.20 %	AzI.0.30 %	RI.0.05 %	RI.0.10 %	RI.0.20 %	RI.0.30 %	VI.0.05 %	VI.0.10 %	VI.0.20 %	VI.0.30 %	Am.I.0.05 %	Am.I.0.10 %	Am.I.0.20 %
1	9.78	9.86	9.85	9.87	9.81	9.83	9.87	9.88	9.85	9.85	9.85	9.87	9.88	9.84	9.85	9.84
2	9.82	9.90	9.86	9.86	9.81	9.87	9.87	9.87	9.86	9.85	9.84	9.85	9.86	9.86	9.86	9.85
3	9.80	9.86	9.89	9.85	9.71	9.86	9.85	9.85	9.86	9.88	9.85	9.84	9.84	9.84	9.85	9.85
4	9.79	9.87	9.88	9.86	9.84	9.86	9.85	9.87	9.87	9.86	9.85	9.86	9.86	9.84	9.85	9.85
5	9.85	9.89	9.89	9.87	9.87	9.87	9.83	9.86	9.87	9.84	9.85	9.87	9.86	9.84	9.84	9.85
6	9.84	9.86	9.88	9.88	9.84	9.87	9.85	9.84	9.88	9.84	9.85	9.85	9.85	9.86	9.85	9.85
7	9.80	9.89	9.87	9.86	9.84	9.85	9.86	9.85	9.86	9.84	9.87	9.86	9.85	9.86	9.85	9.83
8	9.83	9.88	9.85	9.84	9.86	9.83	9.87	9.85	9.85	9.84	9.85	9.85	9.83	9.83	9.85	9.87
9	9.86	9.87	9.86	9.87	9.84	9.86	9.84	9.86	9.85	9.85	9.85	9.83	9.85	9.85	9.85	9.85
10	9.85	9.86	9.84	9.86	9.87	9.86	9.87	9.83	9.88	9.86	9.84	9.86	9.85	9.85	9.85	9.85

Cuadro No. 7 Ancho experimental medido sobre la pieza inyectada de HDPE ( cm  $\pm$  0.005 )

CORRIDA	HDEF	AzI.0.05 %	AzI.0.10 %	AzI.0.20 %	AzI.0.30 %	RI.0.05 %	RI.0.10 %	RI.0.20 %	RI.0.30 %	VI.0.05 %	VI.0.10 %	VI.0.20 %	VI.0.30 %	Am.I.0.05 %	Am.I.0.10 %	Am.I.0.20 %
1	9.81	9.87	9.87	9.88	9.84	9.85	9.87	9.87	9.86	9.85	9.85	9.85	9.84	9.86	9.83	9.84
2	9.84	9.88	9.84	9.84	9.78	9.86	9.87	9.86	9.86	9.86	9.84	9.85	9.87	9.85	9.85	9.84
3	9.80	9.86	9.89	9.84	9.78	9.85	9.87	9.86	9.85	9.88	9.85	9.88	9.86	9.82	9.87	9.83
4	9.79	9.88	9.86	9.83	9.84	9.83	9.87	9.83	9.85	9.86	9.86	9.85	9.84	9.84	9.86	9.83
5	9.84	9.88	9.89	9.85	9.84	9.84	9.86	9.83	9.86	9.85	9.87	9.88	9.84	9.84	9.83	9.84
6	9.83	9.87	9.86	9.85	9.88	9.88	9.85	9.87	9.87	9.84	9.86	9.87	9.85	9.84	9.85	9.83
7	9.81	9.89	9.89	9.85	9.88	9.84	9.86	9.86	9.84	9.85	9.85	9.86	9.86	9.84	9.83	9.82
8	9.84	9.87	9.83	9.86	9.85	9.83	9.87	9.87	9.86	9.85	9.86	9.85	9.86	9.83	9.85	9.85
9	9.85	9.86	9.87	9.88	9.88	9.87	9.85	9.87	9.87	9.86	9.89	9.85	9.87	9.84	9.86	9.84
10	9.83	9.88	9.83	9.85	9.84	9.87	9.85	9.85	9.85	9.83	9.85	9.84	9.85	9.83	9.84	9.83

### C. Cálculos de muestra

- Concentración de aplicación

$$\% \text{ m/m} = (\text{Contenido de pigmento})(100 \%)/(\text{Masa total mezclada})$$

Tenemos que para la muestra del P.B.79, 77007 para 0.05 % se pesó 1,099.45 g de resina y 0.55 g de pigmento. Tenemos entonces que:

$$\% \text{ m/m} = (0.55*100)/(1099.45+0.55) = 0.05 \%$$

- Largo y ancho promedios por análisis

$$\text{Media} = \Sigma (\text{largo o ancho}) / n$$

Para este caso,  $n = 10$  para todas las corridas. Para la corrida de muestra, el largo y ancho promedios son de 9.874 cm respectivamente.

- Encogimiento largo y encogimiento ancho de análisis

$$\text{Encogimiento unidimensional \%} = (\text{L. Molde} - \text{L. Exp})(100 \%/\text{L. Molde})$$

En este caso L puede ser largo o ancho. El largo y ancho del molde es de 10 cm respectivamente. Para la corrida de muestra, el largo y ancho es el mismo, 9,874 cm. Entonces el encogimiento unidimensional es el mismo:

$$\text{Encogimiento unidimensional \%} = (10 - 9.874)(100 \%/10) = 1.26 \%$$

- Nivel de torsión generado por el pigmento

$$\text{Nivel de torsión \%} = (\text{Enc. Largo} - \text{Enc. Ancho})(100 \%/\text{Enc. Ancho})$$

Por último, tenemos 1.26 % de encogimiento en el largo y ancho; para este caso, el nivel de torsión es de 0, es decir, no genera torsión.

- Gráficas generadas para comparaciones

Todas las gráficas se elaboraron en computadora en Microsoft Excel 2000.

## D. Datos calculados

Cuadro No. 8 Datos intermedios calculados

No.	Análisis	COLOR	Concentración	Medidas promedio ( cm )	
			Real (%)	Largo ( $\pm 0.005$ )	Ancho ( $\pm 0.005$ )
1	HDPE Virgen (Calibración)	-	-	9.822	9.824
2	P.B. 29, 77007 al 0.05 %	Azul	0.05	9.874	9.874
3	P.B. 29, 77007 al 0.10 %	Azul	0.10	9.867	9.863
4	P.B. 29, 77007 al 0.20 %	Azul	0.20	9.862	9.853
5	P.B. 29, 77007 al 0.30 %	Azul	0.30	9.829	9.841
6	P.R. 104, 77605 al 0.05 %	Rojo	0.05	9.856	9.852
7	P.R. 104, 77605 al 0.10 %	Rojo	0.10	9.856	9.862
8	P.R. 104, 77605 al 0.20 %	Rojo	0.20	9.856	9.857
9	P.R. 104, 77605 al 0.30 %	Rojo	0.30	9.863	9.857
10	P.G. 17, 77288 al 0.05 %	Verde	0.05	9.851	9.853
11	P.G. 17, 77288 al 0.10 %	Verde	0.10	9.850	9.858
12	P.G. 17, 77288 al 0.20 %	Verde	0.20	9.854	9.858
13	P.G. 17, 77288 al 0.30 %	Verde	0.30	9.853	9.854
14	P.Y. 42, 77492 al 0.05 %	Amarillo	0.05	9.847	9.839
15	P.Y. 42, 77492 al 0.10 %	Amarillo	0.10	9.850	9.847
16	P.Y. 42, 77492 al 0.20 %	Amarillo	0.20	9.849	9.835
17	P.Y. 42, 77492 al 0.30 %	Amarillo	0.30	9.845	9.842
18	P.B. 15:1, 74160 al 0.05 %	Azul	0.05	9.777	9.901
19	P.B. 15:1, 74160 al 0.10 %	Azul	0.10	9.765	9.908
20	P.B. 15:1, 74160 al 0.20 %	Azul	0.20	9.746	9.911
21	P.B. 15:1, 74160 al 0.30 %	Azul	0.30	9.725	9.918
22	P.R. 254, 56110 al 0.05 %	Rojo	0.05	9.799	9.873
23	P.R. 254, 56110 al 0.10 %	Rojo	0.10	9.797	9.885
24	P.R. 254, 56110 al 0.20 %	Rojo	0.20	9.778	9.876
25	P.R. 254, 56110 al 0.30 %	Rojo	0.30	9.781	9.889
26	P.G. 7, 74260 al 0.05 %	Verde	0.05	9.824	9.919
27	P.G. 7, 74260 al 0.10 %	Verde	0.10	9.810	9.913
28	P.G. 7, 74260 al 0.20 %	Verde	0.20	9.806	9.928
29	P.G. 7, 74260 al 0.30 %	Verde	0.30	9.796	9.924
30	P.Y. 62 al 0.05 %	Amarillo	0.05	9.824	9.817
31	P.Y. 62 al 0.10 %	Amarillo	0.10	9.823	9.816
32	P.Y. 62 al 0.20 %	Amarillo	0.20	9.813	9.824
33	P.Y. 62 al 0.30 %	Amarillo	0.30	9.809	9.828

## E. Análisis de error

Por la naturaleza de experimento, solamente se analiza la propagación de error. No se hace análisis estadístico para descartar datos porque el fenómeno de torsión se comporta como el azar. Solamente se descartaron piezas que no fueron bien inyectadas. No podemos descartar datos porque todos sirven para ver la variación en las dimensiones, sean éstas de cualquier magnitud.

- Propagación de error en sumas y restas

$$\Delta error = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta X_i^2}$$

- Propagación de error en multiplicaciones

$$\Delta error = X_{total} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta X_i}{X_i} \right)^2}$$

Cuadro 9. Incertidumbres calculadas para cada cálculo realizado

No.	Análisis	Concentración	Determinación medidas		ENCOGIMIENTO		NIVEL DE
		Real (%)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Largo (%)	Ancho (%)	TORSIÓN (%)
1	HDPE Virgen (Calibración)	-	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0025
2	P.B. 29, 77007 al 0.05 %	0.0091	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	-
3	P.B. 29, 77007 al 0.10 %	0.0045	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0013
4	P.B. 29, 77007 al 0.20 %	0.0023	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0006
5	P.B. 29, 77007 al 0.30 %	0.0015	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0004
6	P.R. 104, 77605 al 0.05 %	0.0091	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0013
7	P.R. 104, 77605 al 0.10 %	0.0045	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0008
8	P.R. 104, 77605 al 0.20 %	0.0023	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050
9	P.R. 104, 77605 al 0.30 %	0.0015	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0008
10	P.G. 17, 77288 al 0.05 %	0.0091	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0025
11	P.G. 17, 77288 al 0.10 %	0.0045	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0006
12	P.G. 17, 77288 al 0.20 %	0.0023	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0013
13	P.G. 17, 77288 al 0.30 %	0.0015	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050
14	P.Y. 42, 77492 al 0.05 %	0.0091	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0006
15	P.Y. 42, 77492 al 0.10 %	0.0045	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0017
16	P.Y. 42, 77492 al 0.20 %	0.0023	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0004
17	P.Y. 42, 77492 al 0.30 %	0.0015	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0017
18	P.B. 15:1, 74160 al 0.05 %	0.0091	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0000
19	P.B. 15:1, 74160 al 0.10 %	0.0045	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0000
20	P.B. 15:1, 74160 al 0.20 %	0.0023	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0000
21	P.B. 15:1, 74160 al 0.30 %	0.0015	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0000
22	P.R. 254, 56110 al 0.05 %	0.0091	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0001
23	P.R. 254, 56110 al 0.10 %	0.0045	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0001
24	P.R. 254, 56110 al 0.20 %	0.0023	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0001
25	P.R. 254, 56110 al 0.30 %	0.0015	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0000
26	P.G. 7, 74260 al 0.05 %	0.0091	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0001
27	P.G. 7, 74260 al 0.10 %	0.0045	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0000
28	P.G. 7, 74260 al 0.20 %	0.0023	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0000
29	P.G. 7, 74260 al 0.30 %	0.0015	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0000
30	P.Y. 62 al 0.05 %	0.0091	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0007
31	P.Y. 62 al 0.10 %	0.0045	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0007
32	P.Y. 62 al 0.20 %	0.0023	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0005
33	P.Y. 62 al 0.30 %	0.0015	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0003

## F. Gráficas complementarias

A continuación se listan varias gráficas necesarias para la comprensión y análisis adecuado del fenómeno.

Gráfico No. 6. Cambios generados por el uso de pigmentos inorgánicos, a diferentes concentraciones, sobre las dimensiones de una pieza inyectada de HDPE

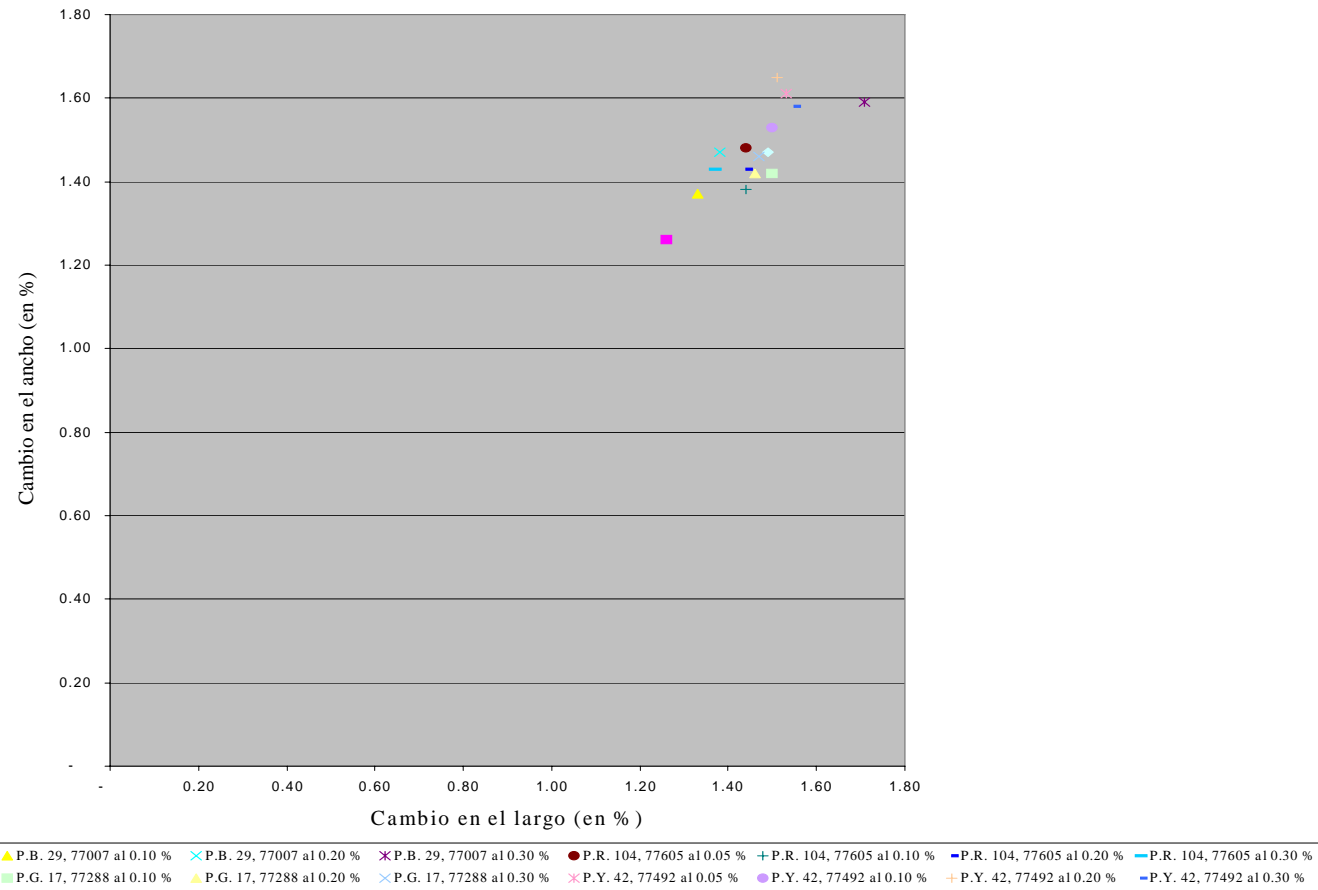


Gráfico No. 7. Cambios generados por el uso de pigmentos orgánicos, a diferentes concentraciones, sobre las dimensiones de una pieza inyectada de HDPE

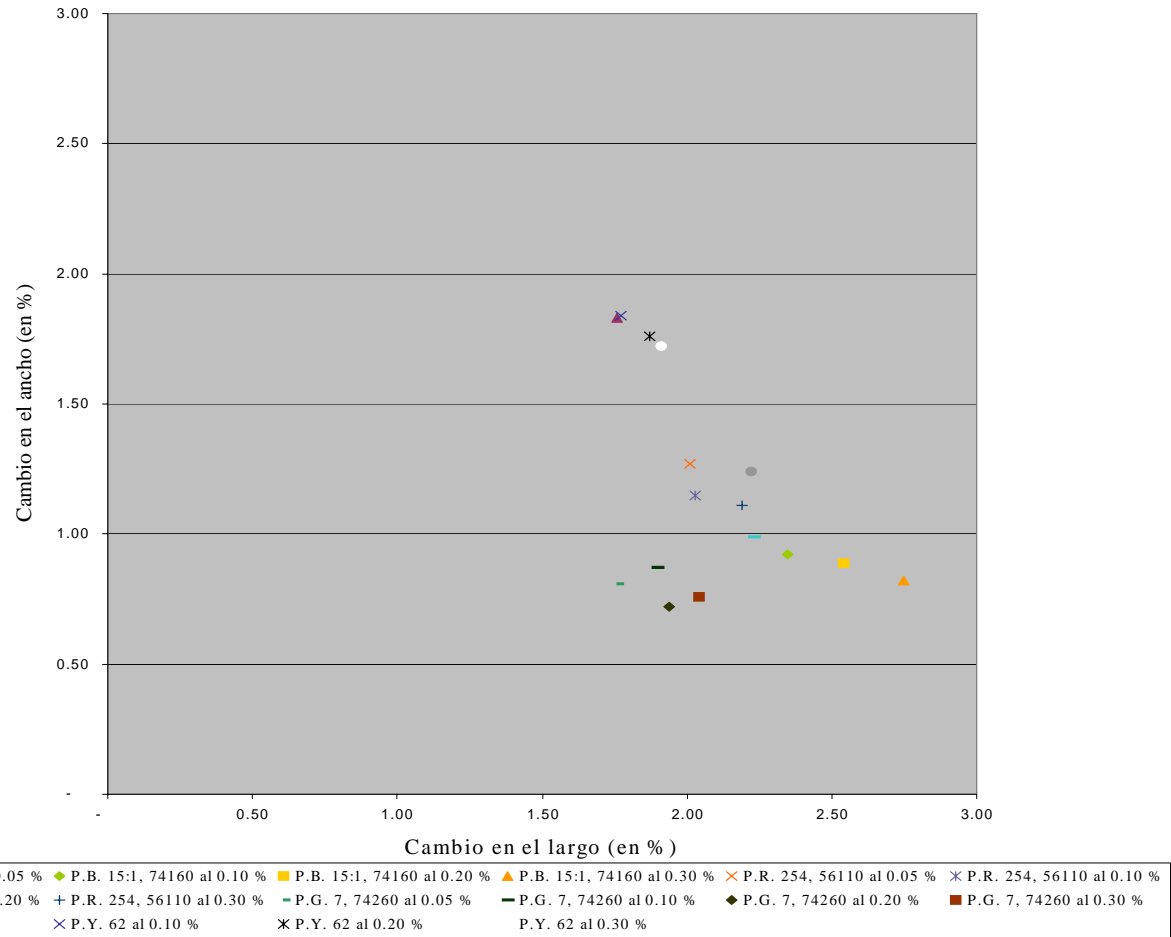
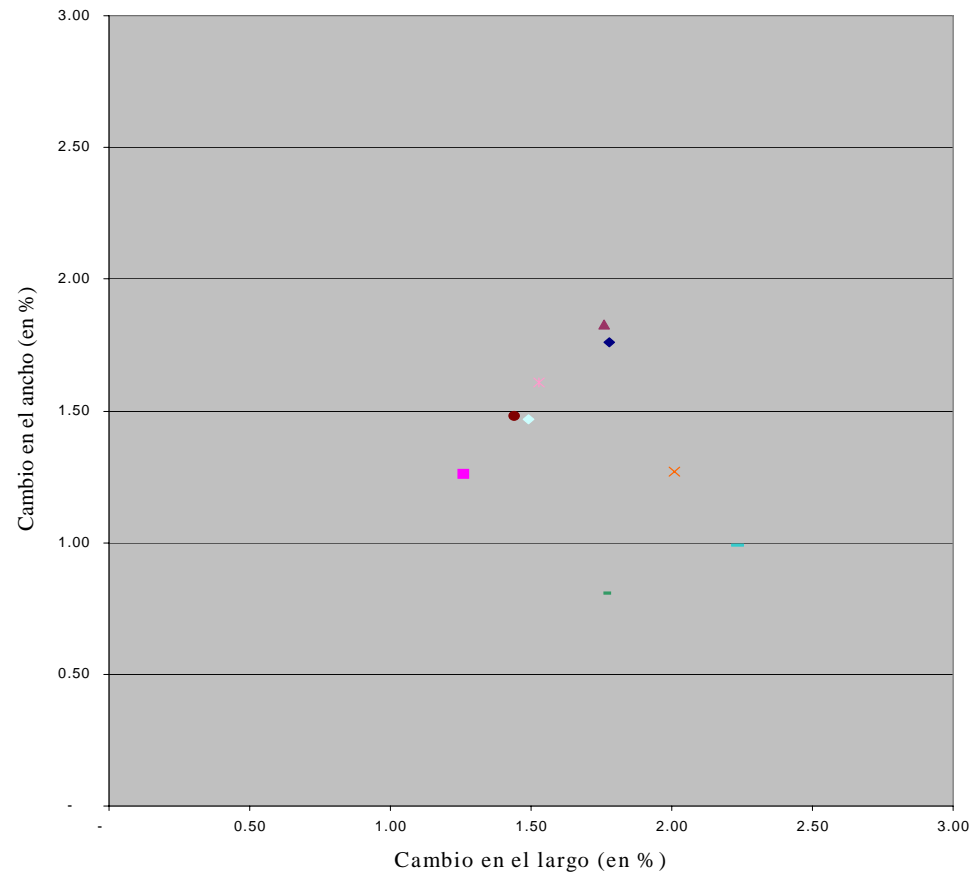
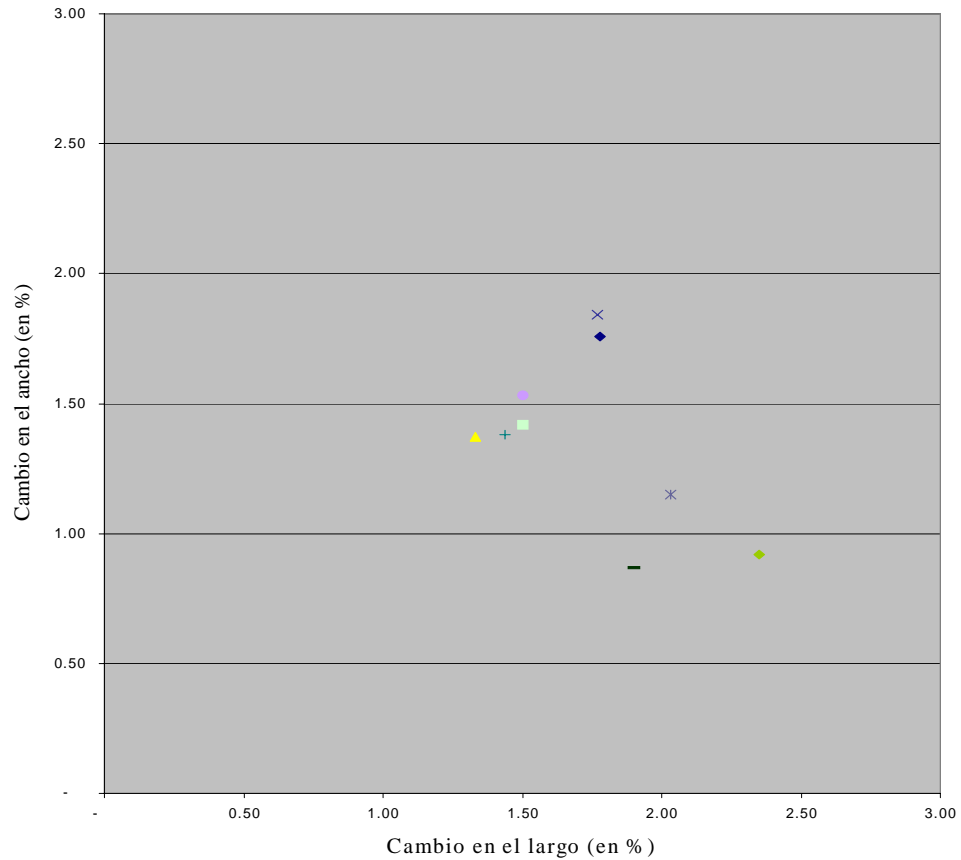


Gráfico No. 8. Cambios generados por el uso de pigmentos, aplicados al 0.05% , sobre las dimensiones de una pieza inyectada de polietileno de alta densidad (HDPE)



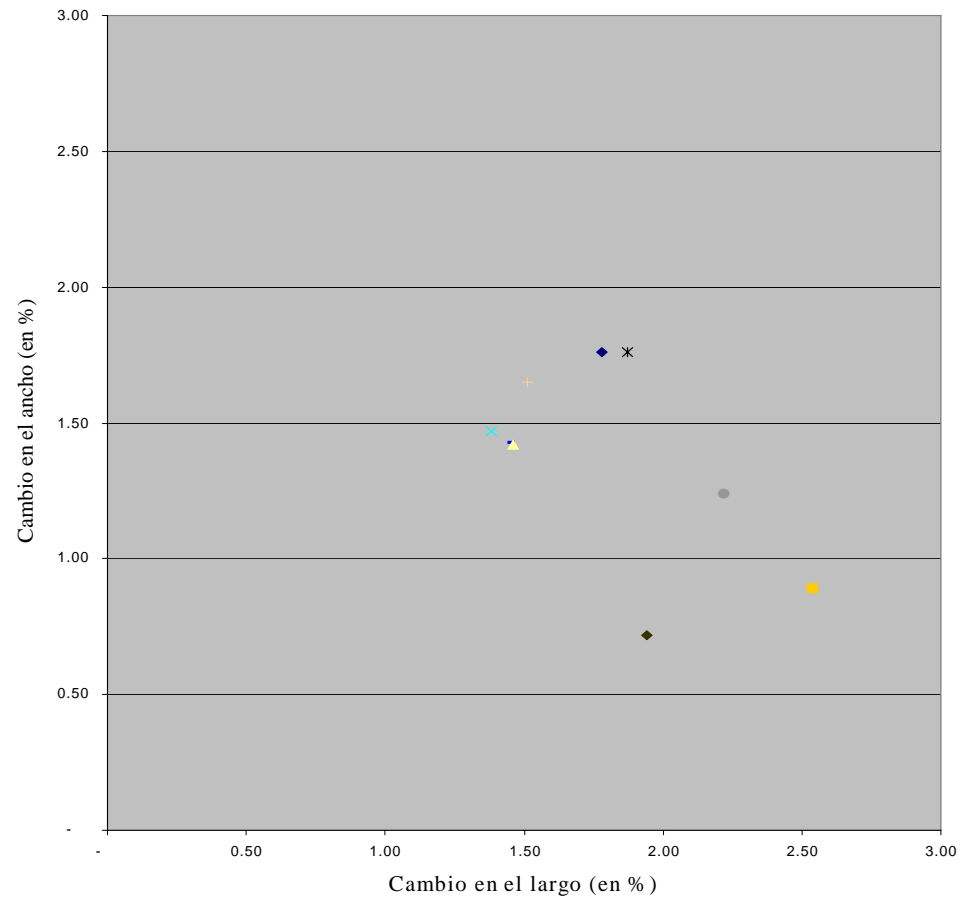
◆ HDPE Virgen (Calibración) ■ P.B. 29, 77007 al 0.05 % ● P.R. 104, 77605 al 0.05 % ◆ P.G. 17, 77288 al 0.05 % ✖ P.Y. 42, 77492 al 0.05 % — P.B. 15:1, 74160 al 0.05 % ✕ P.R. 254, 56110 al 0.05 % — P.G. 7, 74260 al 0.05 % ▲ P.Y. 62 al 0.05 %

Gráfico No. 9. Cambios generados por el uso de pigmentos, aplicados al 0.10% , Sobre las dimensiones de una pieza inyectada de polietileno de alta densidad (HDPE)



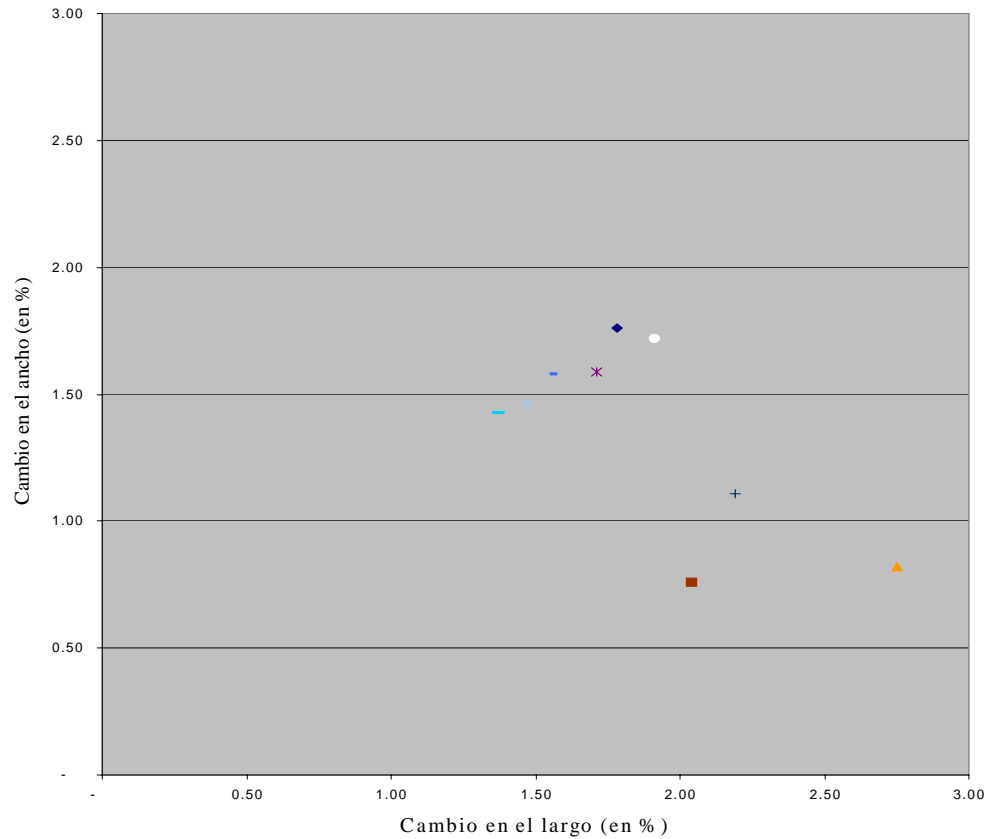
◆ HDPE Virgen (Calibración) ▲ P.B. 29, 77007 al 0.10 % + P.R. 104, 77605 al 0.10 % ■ P.G. 17, 77288 al 0.10 % ● P.Y. 42, 77492 al 0.10 % ◆ P.B. 15:1, 74160 al 0.10 % ✖ P.R. 254, 56110 al 0.10 % — P.G. 7, 74260 al 0.10 % ✖ P.Y. 62 al 0.10 %

Gráfico No. 10. Cambios generados por el uso de pigmentos, aplicados al 0.20% , sobre las dimensiones de una pieza inyectada de polietileno de alta densidad (HDPE)



◆ HDPE Virgen (Calibración) × P.B. 29, 77007 al 0.20 % ■ P.R. 104, 77605 al 0.20 % ▲ P.G. 17, 77288 al 0.20 % + P.Y. 42, 77492 al 0.20 % ■ P.B. 15:1, 74160 al 0.20 % ● P.R. 254, 56110 al 0.20 % ◆ P.G. 7, 74260 al 0.20 % ✕ P.Y. 62 al 0.20 %

Gráfico No. 11. Cambios generados por el uso de pigmentos, aplicados al 0.30% , sobre las dimensiones de una pieza inyectada de polietileno de alta densidad (HDPE)



◆ HDPE Virgen (Calibración) ✖ P.B. 29, 77007 al 0.30 % — P.R. 104, 77605 al 0.30 % ✕ P.G. 17, 77288 al 0.30 % — P.Y. 42, 77492 al 0.30 % ▲ P.B. 15:1, 74160 al 0.30 % + P.R. 254, 56110 al 0.30 % ■ P.G. 7, 74260 al 0.30 % P.Y. 62 al 0.30 %

Gráfico No. 12. Clasificación del nivel de torsión generado por el uso de pigmentos sobre las dimensiones de una pieza inyectada de HDPE

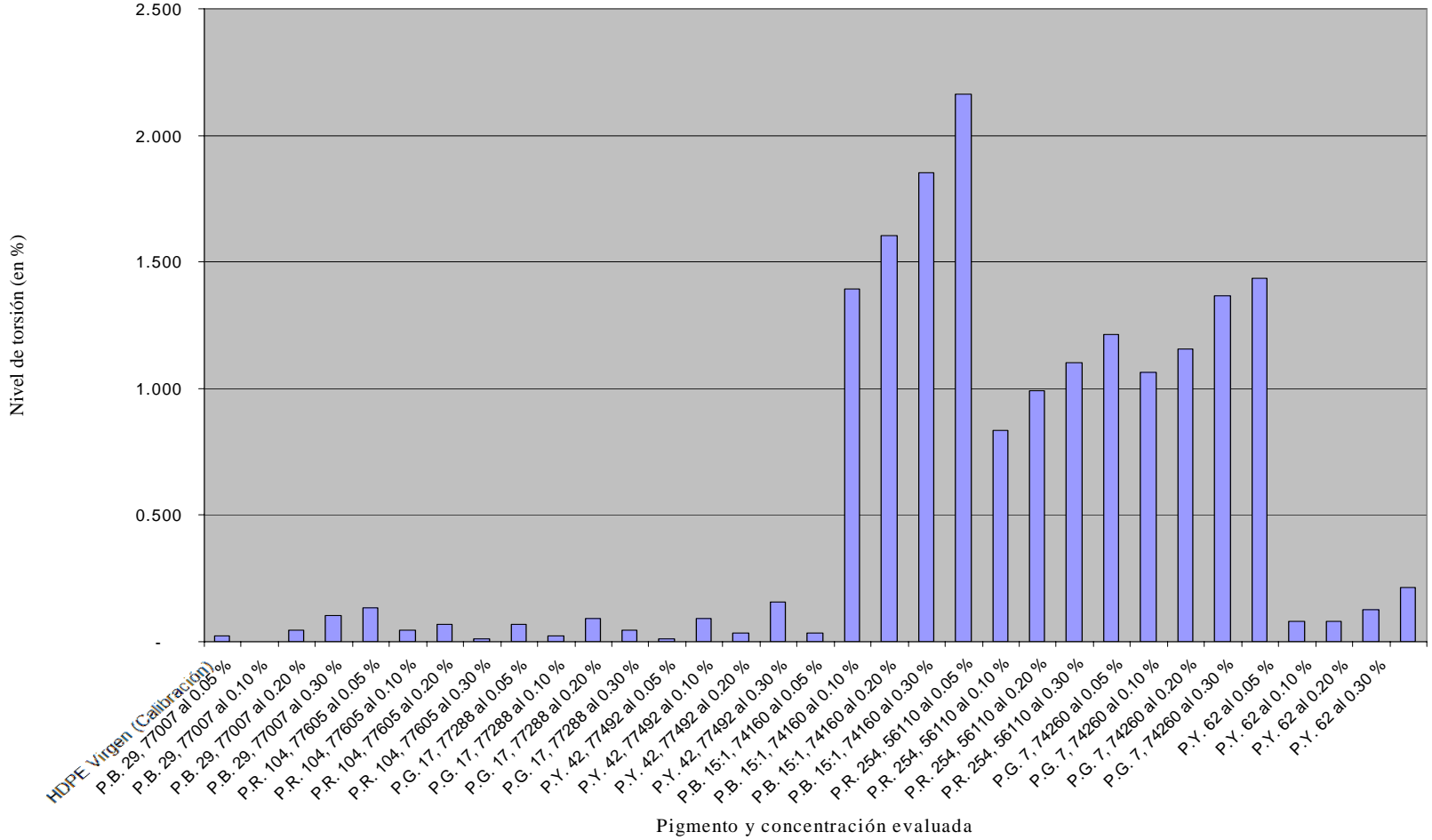


Gráfico No. 13. Comparación entre la concentración de aplicación de pigmentos y el nivel de torsión generado por los mismos sobre una pieza inyectada de HDPE

